



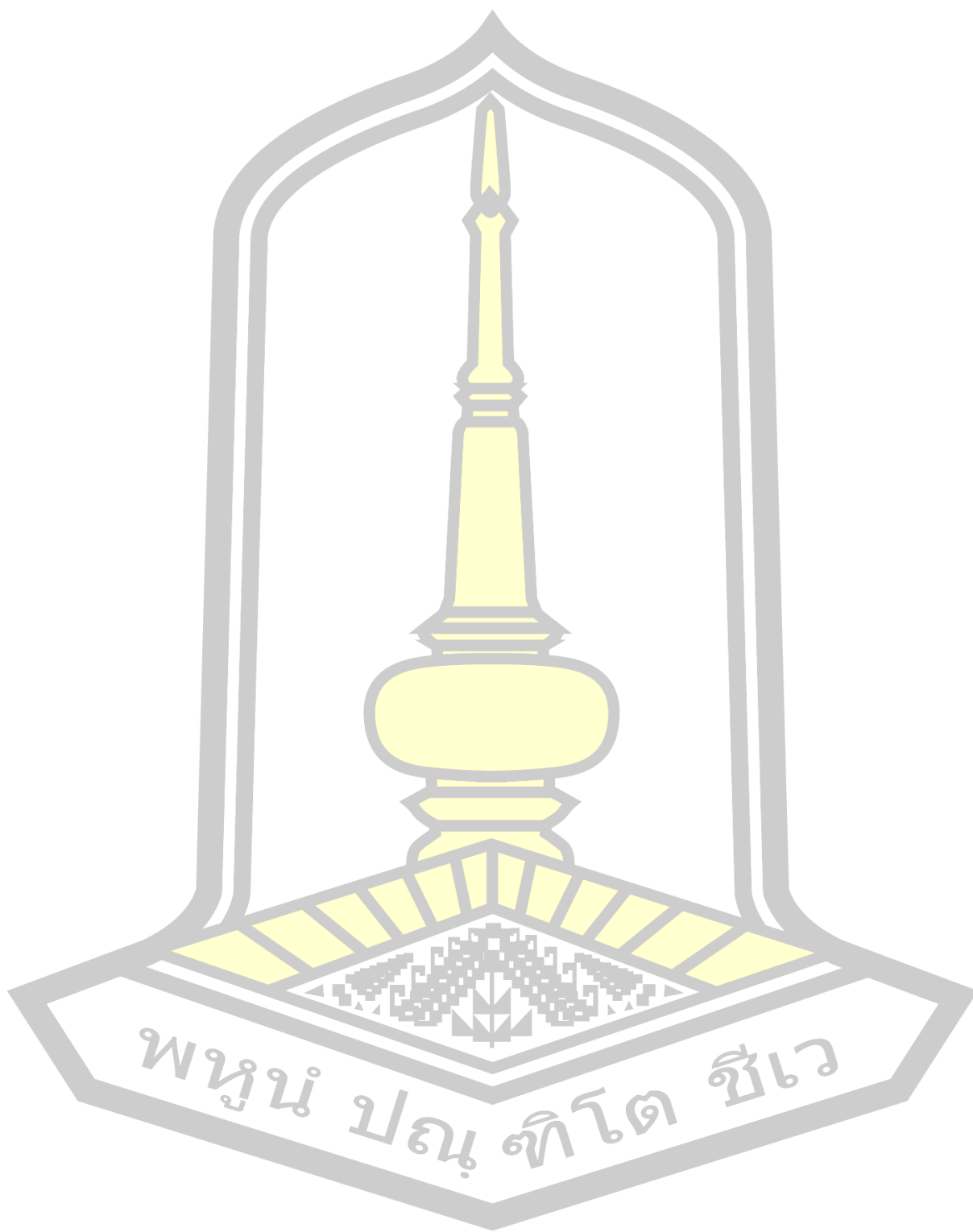
การออกแบบถึงปฏิกรณ์และศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อการย่อยกากตะกอนส่วนเกินและต่อการผลิต
กระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ย่อยกากตะกอนส่วนเกิน

วิทยานิพนธ์
ของ
ประพันธ์ ประจันตะเสน

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

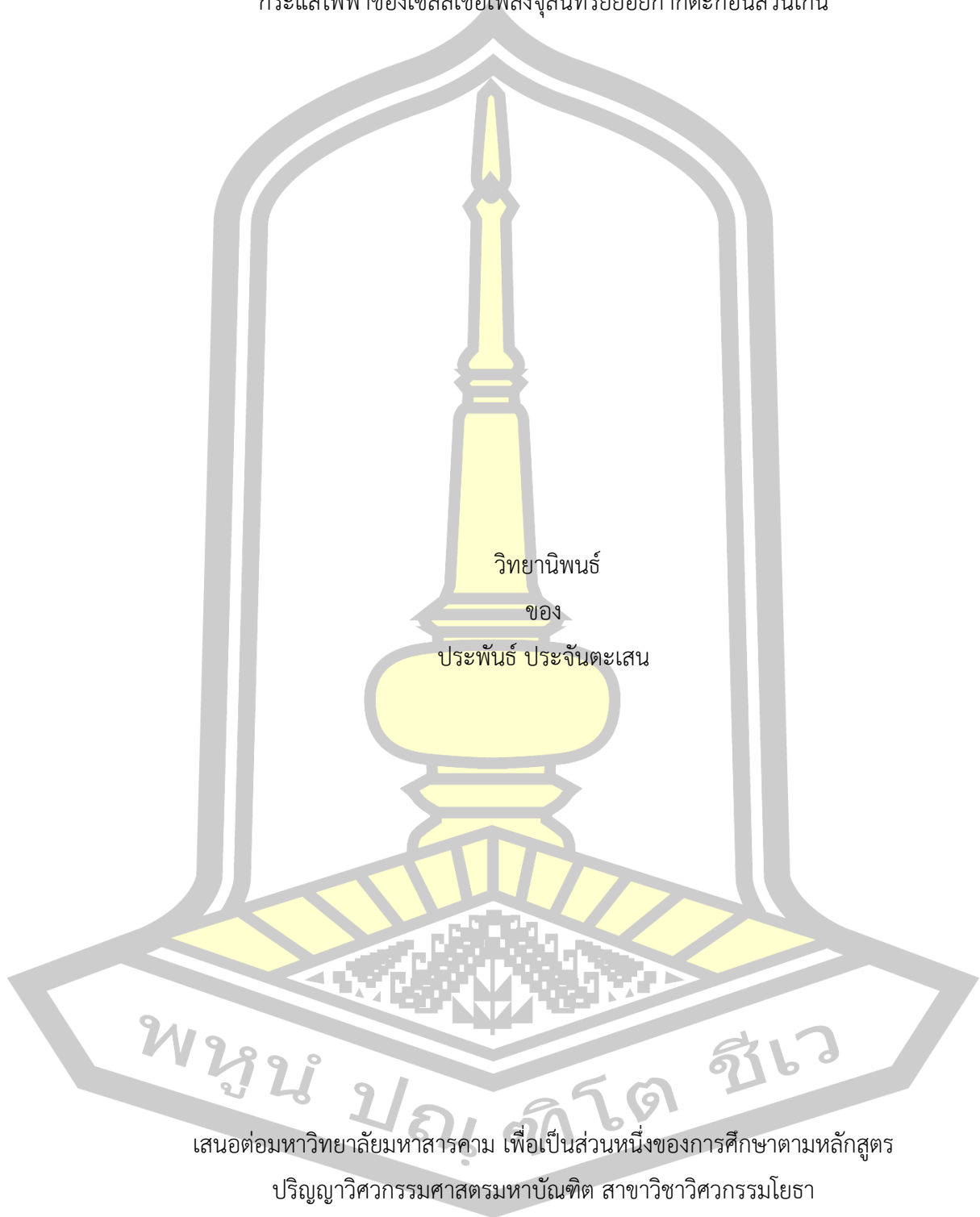
ธันวาคม 2563

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม



พหุณฺ์ ปณฺุ ทิตฺ สวี

การออกแบบถึงปฏิกรณ์และศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อการย่อยกากตะกอนส่วนเกินและการผลิต
กระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ย่อยกากตะกอนส่วนเกิน



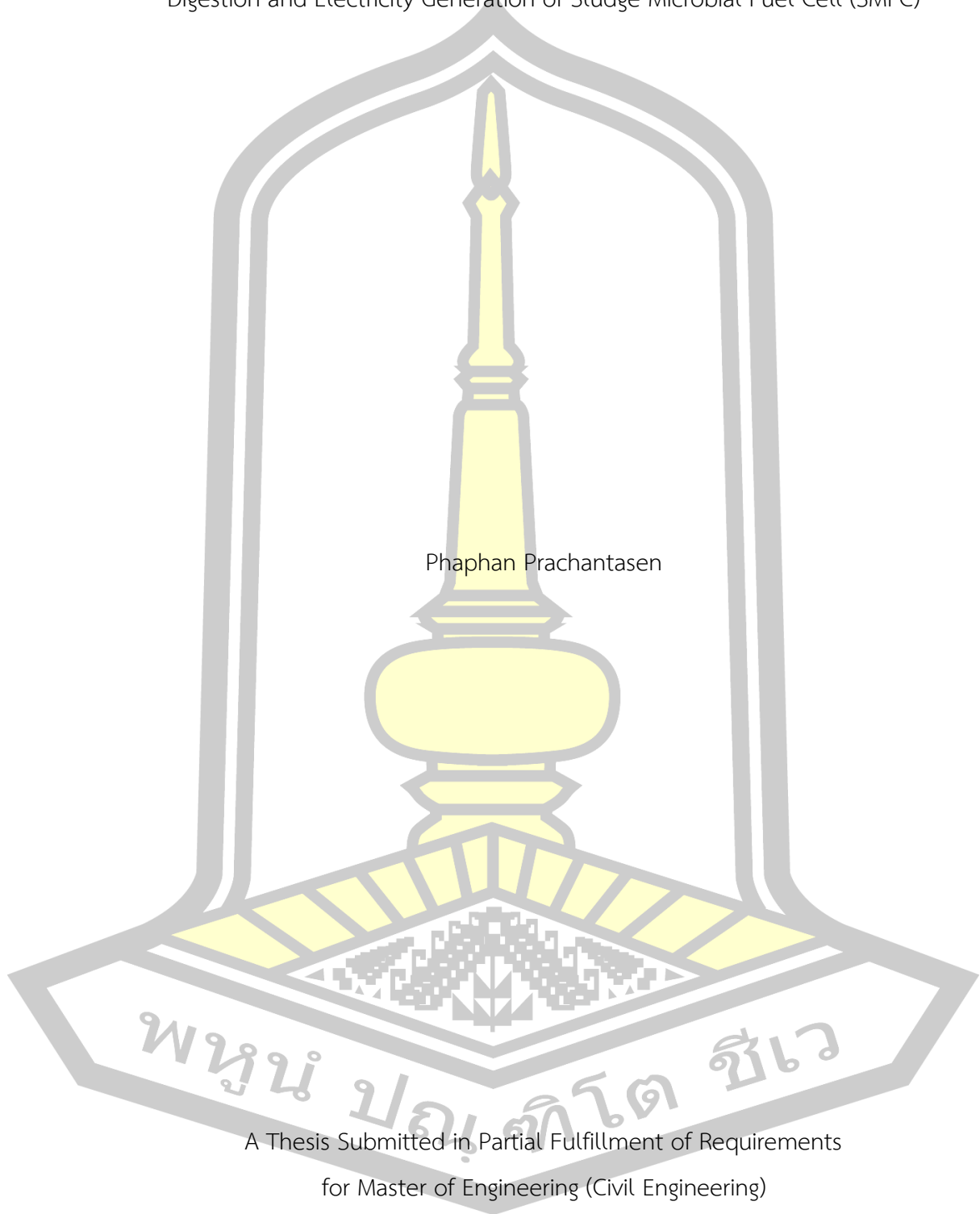
เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

ธันวาคม 2563

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Design of Reactors and Investigation of Temperature Effect on Excess Sludge
Digestion and Electricity Generation of Sludge Microbial Fuel Cell (SMFC)



Phaphan Prachantasen

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements
for Master of Engineering (Civil Engineering)

December 2020

Copyright of Maharakham University



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนายประพันธ์ ประจันตะ
เสน แล้วเห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร. ชลธิศา สุขเกษม)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผศ. ดร. เพชร เพ็งชัย)

กรรมการ

(ศ. ดร. อนงค์ฤทธิ์ แข็งแรง)

กรรมการ

(ผศ. ดร. นิดา ชัยมูล)

มหาวิทยาลัยอนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

(รศ. ดร. เกียรติศักดิ์ ศรีประทีป)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รศ. ดร. กริสน์ ชัยมูล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อเรื่อง	การออกแบบถังปฏิกรณ์และศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อการย่อยกากตะกอนส่วนเกินและการผลิตกระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ย่อยกากตะกอนส่วนเกิน		
ผู้วิจัย	ประพันธ์ ประจันตะเสน		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เพชร เพ็งชัย		
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต	สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัย	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม	ปีที่พิมพ์	2563

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ออกแบบและสร้างเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ย่อยกากตะกอนส่วนเกิน (SMFC: Sludge Microbial Fuel Cell) และศึกษาผลของอุณหภูมิ (30-40 องศาเซลเซียส) ที่มีต่อการย่อยกากตะกอนส่วนเกินและการผลิตไฟฟ้าของ SMFC โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ช่วง คือช่วงทดลองออกแบบ SMFC และช่วงใช้ SMFC ที่ออกแบบในการศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อการย่อยกากตะกอนส่วนเกินและการผลิตไฟฟ้าโดยถังปฏิกรณ์ที่ใช้เป็นหลอดทดลองพลาสติกเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 เซนติเมตร สูง 10.5 เซนติเมตร ความจุหลอด 50 มิลลิลิตร จากผลการทดลองพบว่า SMFC ผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงเมื่อให้ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 4 เซนติเมตร อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ขั้วไฟฟ้าแอโนดต่อแคโทดเท่ากับ 0.75 (แคโทด 4 ตร.ซม : แอโนด 3 ตร.ซม) และใช้ผ้าคาร์บอนทำขั้วไฟฟ้าทั้งแอโนดและแคโทด พบว่า SMFC ที่ออกแบบตามเงื่อนไขดังกล่าว ผลิตพลังงานไฟฟ้าได้มากที่สุด (10.13 mWhr) พร้อมทั้งกำจัดซีโอดี ได้มากที่สุด (77%) เมื่ออุณหภูมิในถังย่อยเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส รองลงมาคือ ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส SMFC ให้พลังงานไฟฟ้า 6.15 mWhr และมีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี 70% และลำดับสุดท้าย คือที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส SMFC ให้พลังงานไฟฟ้า 2.55 mWhr และ ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี 71% เป็นที่น่าสังเกตว่าปฏิกิริยาการกำจัดซีโอดีและการผลิตกำลังไฟฟ้านั้น เป็นปฏิกิริยาลำดับที่หนึ่ง โดยที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส มีค่าคงที่ของปฏิกิริยาสูงที่สุด (0.029 day^{-1} สำหรับ ปฏิกิริยาการกำจัดซีโอดี และ 0.021 day^{-1} สำหรับปฏิกิริยาการผลิตไฟฟ้า)

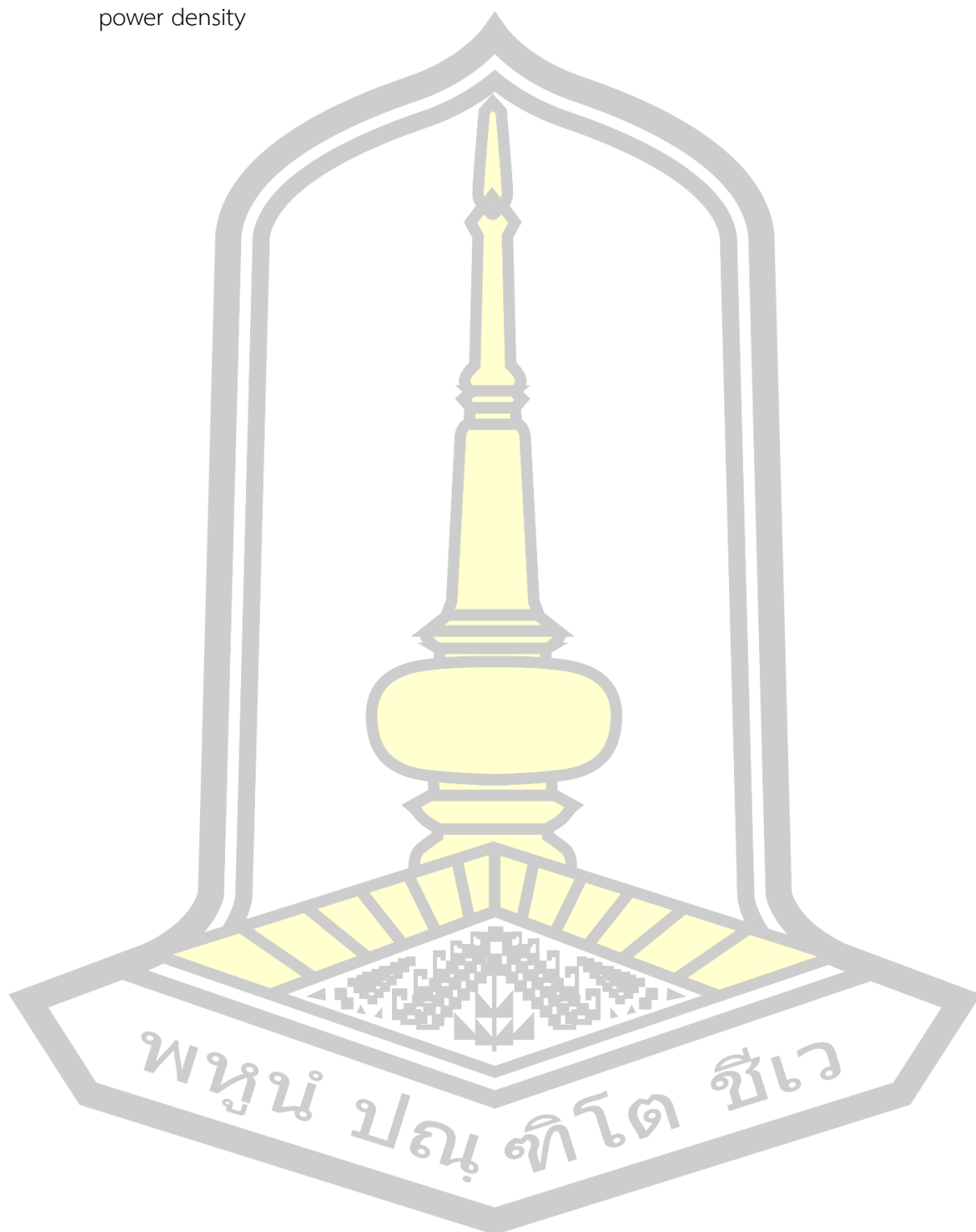
คำสำคัญ : กากตะกอน, เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์, ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า, ขยะความเข้มข้นของแข็งสูง

TITLE	Design of Reactors and Investigation of Temperature Effect on Excess Sludge Digestion and Electricity Generation of Sludge Microbial Fuel Cell (SMFC)		
AUTHOR	Phaphan Prachantasen		
ADVISORS	Assistant Professor Petch Pengchai , Ph.D.		
DEGREE	Master of Engineering	MAJOR	Civil Engineering
UNIVERSITY	Maharakham University	YEAR	2020

ABSTRACT

This study designed and constructed microbial fuel cell for excess sludge digestion (SMFC: Sludge Microbial Fuel Cell) and investigated the effect of temperature (30-40 degrees Celsius) on excess sludge digestion and the electricity generation of SMFC. The experiment included 2 phases, 1) SMFC design experiment, and 2) investigation of temperature effect on SMFC. Plastic tubes with 2.5-cm diameter, 10.5 cm-height, and 50-ml capacity were used as the SMFC reactors. According to experimental results, a SMFC generated high electrical power when an anode and a cathode were made from carbon cloth and placed 4 cm away from each other with ratio between anode size to cathode size of 0.75. Applying the above condition, the SMFC produced highest electrical energy (10.13 mWhr) and achieved highest COD removal efficiency (77%) when the temperature in an anode chamber was 30 degrees Celsius. The secondly high performance of 6.15-mWhr electrical energy and 71% COD removal efficiency, and the lowest performance of 2.55-mWhr electrical energy and 70% COD removal efficiency were observed at 40 degrees Celsius and 35 degrees Celsius, respectively. It was noted that both COD removal and electricity generation of SMFC were the first order reactions. The highest reaction rate constants, i.e. 0.029 day^{-1} for COD removal, and 0.021 day^{-1} for electricity generation, were found in the case of 30-degree Celsius.

Keyword : wasted sludge, microbial fuel cell, high content solid waste, electrical power density



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยการให้ความช่วยเหลือแนะนำของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เพชร เพ็งชัย ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาที่ให้คำแนะนำข้อคิดเห็นตรวจสอบ และแก้ไขร่างวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด ผู้เขียนจึงขอกราบขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้ ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชลธิศา สุขเกษม ที่กรุณาให้เกียรติเป็นประธาน โดยมี ศาสตราจารย์ ดร.อนงค์ฤทธิ์ แข็งแรง และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิตา ชัยมูล เป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้กรุณาตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น รวมถึงบุคลากรของโรงพยาบาลมหาสารคาม ส่วนสิ่งแวดล้อม เจ้าหน้าที่บัณฑิตมหาวิทาลัยมหาสารคาม ทุกท่านที่ให้ความสะดวกด้านอำนวยความสะดวก และประสานงาน ในการทำวิทยานิพนธ์

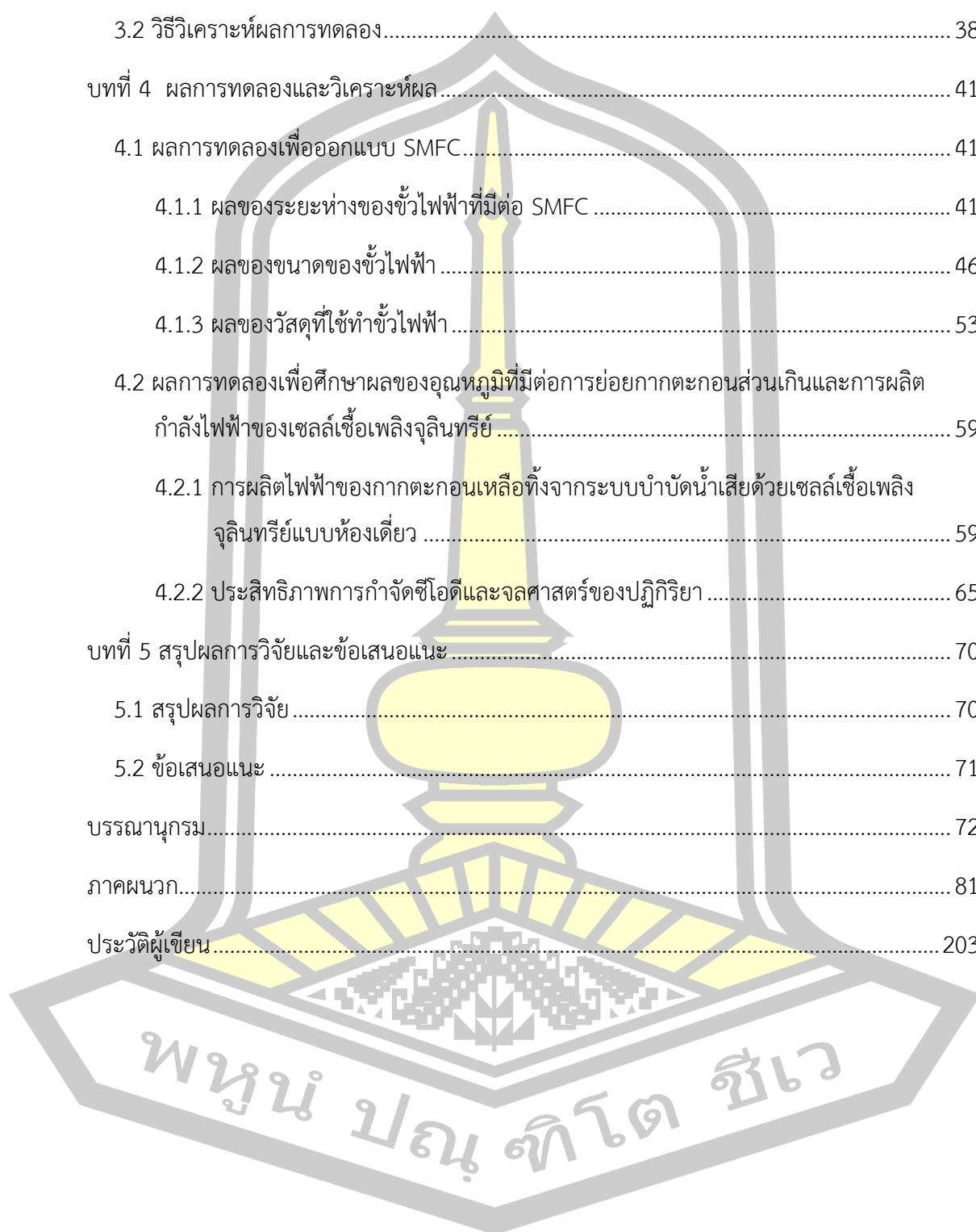
ประพันธ์ ประจันตะเสน



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพประกอบ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ปัญหาและที่มา	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.5 แผนการดำเนินการศึกษา.....	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ลักษณะของกากตะกอนส่วนเกินจากระบบบำบัดน้ำเสีย	5
2.2 การจัดการตะกอนส่วนเกินจากระบบบำบัดน้ำเสีย.....	6
2.3 เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์	14
2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์.....	19
2.5 ทฤษฎีไฟฟ้าเบื้องต้น	20
2.6 อัตราการเกิดปฏิกิริยา (Reaction Rate).....	23
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	27
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	29

3.1 วิธีทดลอง.....	29
3.2 วิธีวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	38
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล.....	41
4.1 ผลการทดลองเพื่อออกแบบ SMFC.....	41
4.1.1 ผลของระยะห่างของขั้วไฟฟ้าที่มีต่อ SMFC	41
4.1.2 ผลของขนาดของขั้วไฟฟ้า	46
4.1.3 ผลของวัสดุที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้า.....	53
4.2 ผลการทดลองเพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อการย่อยกากตะกอนส่วนเกินและการผลิต กำลังไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์.....	59
4.2.1 การผลิตไฟฟ้าของกากตะกอนเหลือทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียด้วยเซลล์เชื้อเพลิง จุลินทรีย์แบบห้องเดี่ยว	59
4.2.2 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีและจุลศาสตร์ของปฏิกิริยา.....	65
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	70
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	70
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	71
บรรณานุกรม.....	72
ภาคผนวก.....	81
ประวัติผู้เขียน.....	203



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 แผนการดำเนินการศึกษา.....	4
ตารางที่ 2. ลักษณะของตะกอนจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบต่าง ๆ.....	5
ตารางที่ 3 ลักษณะคุณสมบัติทางเคมีของตะกอนจากการทบทวนงานวิจัย.....	8
ตารางที่ 4 ธาตุอาหารรองที่มีผลต่อการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกาศ.....	14
ตารางที่ 5 Standard Potentials E_0 and Theoretical Potentials for Typical Conditions in MFC.....	17
ตารางที่ 6 อัตราส่วนของขั้วไฟฟ้าแคโทดต่อขั้วไฟฟ้าแอโนด	32
ตารางที่ 7 พารามิเตอร์ในการตรวจวัด	37
ตารางที่ 8 เปรียบเทียบค่าทางไฟฟ้าของการศึกษาระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า	45
ตารางที่ 9 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของการศึกษาระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า	46
ตารางที่ 10 เปรียบเทียบค่าทางไฟฟ้าของการศึกษาขนาดของขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทด	50
ตารางที่ 11 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของการศึกษาขนาดขั้วไฟฟ้า	52
ตารางที่ 12 เปรียบเทียบค่าทางไฟฟ้าของการศึกษาวัสดุที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้า.....	56
ตารางที่ 13 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของวัสดุที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้า	58
ตารางที่ 14 ค่าพารามิเตอร์เบื้องต้นของภาคตะกอนส่วนเกินที่ใช้ในงานวิจัย	59
ตารางที่ 15 ค่าไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน.....	62
ตารางที่ 16 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีที่อุณหภูมิต่างกัน	67
ตารางที่ 17 การเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ผลิตได้โดยเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ของงานวิจัยอื่น ๆ กับงานวิจัยนี้.....	69

สารบัญภาพประกอบ

	หน้า
รูปที่ 1 วิธีการจัดการตะกอนส่วนเกินจากระบบบำบัดน้ำเสีย	9
รูปที่ 2 ถังย่อยสลัดจ์แบบอัตราต่ำ	10
รูปที่ 3 ถังย่อยสลัดจ์แบบอัตราสูง	11
รูปที่ 4 เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้องเดี่ยว.....	15
รูปที่ 5 เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้องคู่	17
รูปที่ 6 ปฏิกริยาภายในห้องแอโนดและห้องแคโทด	18
รูปที่ 7 Polarization Curve.....	22
รูปที่ 8 กราฟอัตราการเกิดปฏิกริยา	23
รูปที่ 9 กราฟอัตราของปฏิกริยาอันดับศูนย์.....	24
รูปที่ 10 กราฟอัตราของปฏิกริยาอันดับหนึ่ง.....	25
รูปที่ 11 กราฟอัตราของปฏิกริยาอันดับสอง.....	26
รูปที่ 12 แผนผังแสดงขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย.....	29
รูปที่ 13 ถังปฏิกริยา SMFC (ก) และ ตะกอนส่วนเกิน (ข).....	30
รูปที่ 14 ภาพขณะบรรจุกากตะกอนส่วนเกินที่ใช้ในการทดลองออกแบบระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าของ SMFC _{1d} , SMFC _{2d} และ SMFC _{3d}	31
รูปที่ 15 ภาพรวมของเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองออกแบบขนาดขั้วไฟฟ้า SMFC _{1r} - SMFC _{7r}	33
รูปที่ 16 วัสดุที่ใช้เป็นขั้วอิเล็กโทรด	33
รูปที่ 17 การทดลองออกแบบวัสดุทำขั้วไฟฟ้าที่ใช้ใน SMFC SMFC _{1m} - SMFC _{4m}	34
รูปที่ 18 ไดอะแกรมชุดถังปฏิกริยา.....	36
รูปที่ 19 เครื่องควบคุมอุณหภูมิ และ Temperature data logger	36
รูปที่ 20 สมการการคำนวณอัตราของอันดับการเกิดปฏิกริยา	40

รูปที่ 21 ผลการทดลองโพลาริเซชันที่มีความต้านทานภายนอก 150 - 10000 โอห์ม	42
รูปที่ 22 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (ก) ค่ากระแสไฟฟ้า (ข) และค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า (ค) ที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าที่แตกต่างกัน 3 ระยะ	44
รูปที่ 23 การกำจัดตะกอนและผลิตไฟฟ้าของ SMFC	45
รูปที่ 24 ผลการทดลองโพลาริเซชันที่ค่าความต้านทานภายนอก 150 - 20000 โอห์ม.....	48
รูปที่ 25 การเปลี่ยนแปลงของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (ก) และการเปลี่ยนแปลงค่าของกระแสไฟฟ้า (ข) และค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า (ค) ที่อัตราส่วนของขนาดขั้วไฟฟ้า 7 รูปแบบ	49
รูปที่ 26 การกำจัดตะกอนและผลิตไฟฟ้าของ SMFC	51
รูปที่ 27 ผลการทดลองโพลาริเซชันที่ค่าความต้านทานภายนอก 150 - 20000 โอห์ม.....	54
รูปที่ 28 การเปลี่ยนแปลงของความต่างศักย์ไฟฟ้า (ก) การเปลี่ยนแปลงค่าของกระแสไฟฟ้า (ข) และค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า (ค) ที่วัสดุของขั้วไฟฟ้าแตกต่างกัน	55
รูปที่ 29 การกำจัดตะกอนและผลิตไฟฟ้าของ SMFC	57
รูปที่ 30 ผลการทดลองโพลาริเซชันที่ค่าความต้านทานภายนอก 150 - 20000 โอห์ม.....	61
รูปที่ 31 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (ก) ค่ากระแสไฟฟ้า (ข) และค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้า (ค) จากการเดินระบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ ในอุณหภูมิที่แตกต่างกัน	63
รูปที่ 32 จลศาสตร์ปฏิกิริยาของการผลิตกำลังไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์.....	64
รูปที่ 33 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี (ก) และ อัตราการเกิดปฏิกิริยาการกำจัดซีโอดี (ข).....	66
รูปที่ 34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกำจัดซีโอดีและค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า ...	68



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ปัญหาและที่มา

ระบบบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่งหรือระบบเอเอส (Activated Sludge, AS) เป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่ได้รับความนิยมมากระบบหนึ่ง พัฒนาขึ้นโดยวิศวกรและนักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษชื่อ Arden และ Lockett เมื่อปี ค.ศ. 1914 (International Water association, 2014) ในประเทศไทยร้อยละ 36 ของระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนเป็นระบบเอเอสซึ่งใช้พื้นที่ก่อสร้างระบบน้อยและมีประสิทธิภาพบำบัดสารอินทรีย์ในรูปบีโอดีสูงถึงร้อยละ 80 - 95 (กรมควบคุมมลพิษ, 2558) อย่างไรก็ตาม เนื่องจากระบบเอเอสใช้ตะกอนจุลินทรีย์จำพวกหายใจโดยใช้ออกซิเจน (aerobic bacteria) เป็นตัวกำจัดสิ่งสกปรกในน้ำ (กรมควบคุมมลพิษ, 2558) จึงมีข้อจำกัดคือใช้พลังงานสูงในการเติมอากาศให้เพียงพอต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ อีกทั้งยังมีกากตะกอนจำนวนมากเกิดขึ้นระหว่างเดินระบบ (กรมควบคุมมลพิษ, 2558) ทำให้ต้องมีกระบวนการกำจัดตะกอนส่วนเกิน (excess sludge)

การกำจัดกากตะกอนส่วนเกินจากการบำบัดน้ำเสียมีอยู่หลายวิธี เช่น ถมที่ ทิ้งทะเล เผา ใส่ในพื้นที่เกษตรกรรม ผลิตเป็นอาหารสัตว์ ผึ่งกลบ เป็นต้น (สุพจน์ เดชผล, 2546) คณะอนุกรรมการมาตรฐานการประกอบวิชาชีพวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมสภาวิศวกร (2555) รายงานว่ากระบวนการบำบัดและกำจัดกากตะกอนในขั้นสุดท้ายเป็นปัญหาสำคัญที่ผู้ออกแบบและผู้ควบคุมระบบมักประสบกับความยุ่งยากอยู่เสมอ เพราะค่าลงทุนและค่าใช้จ่ายในการกำจัดตะกอนมีสัดส่วนที่ค่อนข้างสูงคืออยู่ในราวร้อยละ 20-40 ของค่าลงทุนและค่าใช้จ่ายทั้งหมดของโครงการ จึงไม่คุ้มกับการลงทุนในเชิงพาณิชย์ จากสภาวะดังกล่าวข้างต้นผู้วิจัยจึงสนใจเทคโนโลยีต้นทุนต่ำที่สามารถกำจัดกากตะกอนส่วนเกินได้ผล

เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ (MFC : Microbial Fuel Cell) เป็นเทคโนโลยีสะอาดชนิดหนึ่ง ซึ่งสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าขึ้นโดยตรงจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ผ่านสิ่งมีชีวิตเซลล์เดียวภายใต้สภาวะไร้อากาศ เนื่องจากกระบวนการทำงานของ MFC ไม่มีการเผาไหม้เกิดขึ้นในปฏิกิริยาจึงไม่ก่อให้เกิดก๊าซที่เป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม (Baicea et al., 2013) โดยปกติแล้ว MFC จะถูกใช้บำบัด น้ำเสียชนิดต่างๆ โดยใช้ตะกอนน้ำเสียเป็นหัวเชื้อจุลินทรีย์สำหรับการเริ่มต้นกระบวนการ (D. Ye et al., 2013)

เมื่อไม่นานมานี้ นักวิจัยชาวต่างชาติจำนวนหนึ่งได้ค้นพบว่าสามารถนำกากตะกอนส่วนเกินจากระบบบำบัดน้ำเสียมาบำบัดโดยใช้ MFC ทำให้เกิดผลพลอยได้เป็นกระแสไฟฟ้า (Gude, 2016) ระบุว่าการเปลี่ยนของเสียเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรงผ่าน MFC เป็นทางเลือกที่ดีกว่าในการกำจัดกาก

ตะกอนในระบบบำบัดน้ำเสียแบบเดิม (G. Zhang et al., 2012) พบว่า MFC แบบห้องคู่สามารถผลิตกำลังไฟฟ้า 13.2 วัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร มีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีร้อยละ 40.8 และมีประสิทธิภาพคลอโรฟอร์มร้อยละ 19.4 (Zhao et al., 2009) พบว่า MFC ที่ใช้บำบัดกากตะกอนสามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าได้ถึง 0.687 โวลต์ ให้กำลังไฟฟ้า 8.5 วัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร และมีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีร้อยละ 46.4 (Yang et al., 2013a) พบว่า MFC แบบห้องเดี่ยว ที่ถูกใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าจากการหมักตะกอน สามารถลดปริมาณสารแขวนลอยทั้งหมด จาก 26.1 กรัมต่อลิตร เหลือ 16.5 กรัมต่อลิตร ลดของแข็งแขวนลอยระเหยได้ จาก 24.1 กรัมต่อลิตร เหลือ 15.3 กรัมต่อลิตร ผลิตกำลังไฟฟ้าได้ 0.32 วัตต์ต่อตารางเมตร มีประสิทธิภาพคลอโรฟอร์มร้อยละ 18 - 57 มีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีร้อยละ 84 - 94 จากข้อมูลข้างต้นกล่าวได้ว่า MFC เป็นเทคโนโลยีที่สามารถกำจัดตะกอนส่วนเกินจากระบบบำบัดน้ำเสียได้โดยให้ผลพลอยได้เป็นกระแสไฟฟ้า จึงเป็นที่น่าสนใจนำ MFC มาใช้กำจัดกากตะกอนส่วนเกินจากระบบเอเอสของโรงพยาบาลมหาสารคามซึ่งกำลังประสบปัญหาขาดแคลนเนื้อที่และงบประมาณในการกำจัด

โดยทั่วไปเมื่ออุณหภูมิเพิ่ม อัตราเร็วในการทำปฏิกิริยาของเอ็นไซม์ในสิ่งมีชีวิตก็มักจะเพิ่มขึ้นด้วย แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิไปจนถึงจุดหนึ่งที่ทำให้อัตราเร็วในการทำปฏิกิริยาสูงสุดก็จะพบว่าอัตราเร็วในการทำปฏิกิริยามีค่าลดลง (JR et al., 2007) ทั้งนี้เป็นที่ทราบกันว่า อัตราเร็วในการย่อยสลายของเสียแบบไร้อากาศของจุลินทรีย์ในช่วงเทอร์มอฟิลิก (อุณหภูมิ 50-60 องศาเซลเซียส) มีค่าสูงกว่าในช่วงเมโซฟิลิก (อุณหภูมิ 30-38 องศาเซลเซียส) (Gebreyessus, 2016) (Larrosa-Guerrero et al., 2010) พบว่า ที่อุณหภูมิ 8 และ 25 องศาเซลเซียส ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีมีค่าใกล้เคียงกันคือ ร้อยละ 40 - 50 ค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่อุณหภูมิ 8 และ 25 องศาเซลเซียส อยู่ที่ 207.31 มิลลิโวลต์ และ 179.14 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ โดยกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ MFC ผลิตได้ ณ 4 องศาเซลเซียส มีค่า 294.6 มิลลิวัตต์ต่อลูกบาศก์เมตรซึ่งสูงกว่า ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ซึ่งผลิตได้เพียง 174.0 มิลลิวัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร (Junfeng Wang et al., 2017) เพาะเลี้ยงกากตะกอนส่วนเกินจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่งไว้ที่อุณหภูมิ 25 ก่อนนำมาทดลองใช้ MFC บำบัดที่อุณหภูมิต่างๆกัน (25, 35 และ 45 องศาเซลเซียส) ผลปรากฏว่าที่อุณหภูมิการเดินระบบ 25 องศาเซลเซียส MFC ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 54 มิลลิวัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งสูงกว่ากรณีของอุณหภูมิ 35 และ 45 องศาเซลเซียสอย่างชัดเจน (Junfeng Wang et al., 2017) อธิบายสาเหตุว่ามาจากข้อจำกัดเรื่องปริมาณสารอาหารใน MFC และเมื่อเขาลดอุณหภูมิของ MFC ชุดที่มีอุณหภูมิ 35 และ 45 องศาเซลเซียสลงเป็น 25 องศาเซลเซียส เขาพบว่าไฟฟ้าที่ผลิตได้มีค่าไม่สูงเท่ากรณีที่ใช้อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสอย่างคงที่มาตั้งแต่ต้น เขาจึงสรุปว่าควรรักษาอุณหภูมิในการเดินระบบของ MFC ให้เท่ากับช่วงเพาะเลี้ยง (start-up) อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัย ของ (D. Ye et al., 2013) กลับพบว่า MFC ที่ทำงานในอุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียสให้กำลังไฟฟ้า 7.89 มิลลิวัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งสูงกว่ากรณี

อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส (6.34 มิลลิวัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร) กรณีอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส (2.64 มิลลิวัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร) และกรณีอุณหภูมิ 43 องศาเซลเซียส (D. Ye et al., 2013) พบว่าที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส MFC มีความต้านทานภายในต่ำสุด จึงให้กำลังไฟฟ้าได้สูงสุด

ผลการศึกษาในงานวิจัยที่ผ่านมาดังกล่าวชี้ให้เห็นว่าอุณหภูมิมีผลต่อการทำงานของ MFC แต่ไม่สามารถระบุออกมาเป็นค่ามาตรฐานสำหรับ MFC ทุกชนิดได้ ผู้วิจัยสันนิษฐานว่าอาจเป็นเพราะความแตกต่าง ในด้านโครงสร้างและวัสดุอุปกรณ์ตลอดจนชนิดจุลินทรีย์ที่ใช้ใน MFC ซึ่งส่งผลต่อความต้านทานภายในและความเร็วในการทำงานของเอ็นไซม์ใน MFC หากต้องการให้ MFC ที่สร้างขึ้นสามารถทำงานด้วยสมรรถนะสูงก็ควรมีการสำรวจอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเดินระบบเสียก่อน ดังนั้น ผู้วิจัยจึงสนใจประดิษฐ์ MFC สำหรับกำจัดกากตะกอน (SMFC : Sludge Microbial Fuel Cell) ขึ้นด้วยวัสดุราคาประหยัด แล้วใช้ SMFC ดังกล่าวทดลองย่อยกากตะกอนส่วนเกินจากระบบเอเอสของโรงพยาบาลมหาสารคาม ณ อุณหภูมิต่างๆกัน เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อการผลิตไฟฟ้าและการย่อยกากตะกอนส่วนเกิน โดยหวังว่า ผลของงานวิจัยนี้จะสามารถนำไปใช้ประโยชน์ ในการออกแบบและควบคุมการทำงานของถังย่อยกากตะกอนส่วนเกิน ในโรงบำบัดน้ำเสียขนาดเล็ก เช่น ระบบเอเอสของโรงพยาบาลมหาสารคาม เป็นผลให้สามารถกำจัดกากตะกอนส่วนเกินได้อย่างรวดเร็ว และได้รับผลพลอยได้เป็นพลังงานไฟฟ้า

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อออกแบบ SMFC (Sludge Microbial Fuel Cell) และศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อการย่อยกากตะกอนส่วนเกินและผลิตกำลังไฟฟ้าของ SMFC

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 กากตะกอนส่วนเกินจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่งของโรงพยาบาลมหาสารคาม

1.3.2 MFC แบบห้องเดียว ไม่ใช้เมมเบรน

1.3.3 ตัวแปรของการวิจัย

1.3.1.1 ตัวแปรอิสระ ได้แก่ อุณหภูมิในห้องแอโนด 30, 35 และ 40 องศาเซลเซียส

1.3.1.2 ตัวแปรตาม ได้แก่ ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้าที่เซลล์

เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ผลิตได้ ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี และ อัตราเร็วในการย่อยสลายซีโอดี

1.3.1.3 ตัวแปรควบคุม ได้แก่ ส่วนผสมของวัตถุดิบในห้องแอโนด

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถนำข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดกากตะกอนส่วนเกินจากระบบบำบัดน้ำเสียในส่วนของโรงพยาบาลได้

1.4.2 เพื่อให้ทราบถึงศักยภาพเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้องเดี่ยวในการผลิตกระแสไฟฟ้าและบำบัดกากตะกอนส่วนเกินจากระบบบำบัดน้ำเสียจริงจากโรงพยาบาล

1.5 แผนการดำเนินการศึกษา

ตารางที่ 1 แผนการดำเนินการศึกษา

รายการ	ระยะเวลา									
	ภาคการเรียนที่ 2/2561					ภาคเรียนที่ 1/2563				
	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.
1. กำหนดหัวข้อเรื่องและจัดทำเค้าโครง	←	→								
2. ศึกษาระบบการทำงานและออกแบบ MFC			←	→						
3. เสนอเค้าโครงร่างวิจัย			←	→						
4. สร้าง MFC					←	→				
5. ทดสอบวัสดุประสงค์					←	→				
6. วิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผล							←	→		
7. เสนอผลงานวิจัย									←	→
8. จัดทำรูปเล่ม									←	→

พหุบัณฑิต ชีวะ

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ลักษณะของกากตะกอนส่วนเกินจากระบบบำบัดน้ำเสีย

กากตะกอนส่วนเกินจากระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพนั้น โดยส่วนใหญ่จะเป็นตะกอนจุลินทรีย์ที่เจริญเติบโตและเพิ่มจำนวนมากขึ้นจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ต่าง ๆ ในระบบบำบัดน้ำเสีย ซึ่งสามารถแยกตัวออกจากน้ำเสียได้โดยการตกตะกอนในถังตกตะกอน ซึ่งมีปริมาณที่แตกต่างกันไปตามชนิดและแหล่งที่มาของตะกอน

ปริมาณกากตะกอนส่วนเกินจากระบบบำบัดแบบแอกติเวตเตดสลัดจ์ (ACTIVATED SLUDGE PROCESS) จะมีน้ำเป็นองค์ประกอบถึงร้อยละ 90-97 ปริมาณของแข็งทั้งหมดประมาณร้อยละ 0.5-1 และปริมาณของแข็งระเหยง่ายทั้งหมดประมาณร้อยละ 60-80 โดยน้ำหนักแห้ง หรือปริมาณของแข็งทั้งหมดประมาณร้อยละ 0.8-1.2 และปริมาณของแข็งระเหยง่ายประมาณร้อยละ 59-88 ของปริมาณของแข็งทั้งหมด แสดงว่าตะกอนส่วนเกินมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ ซึ่งมีลักษณะสมบัติทางกายภาพ เคมีที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2 ปริมาณกากตะกอนส่วนเกินที่เกิดขึ้นจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่งมีอัตราการเกิดโดยเฉลี่ยประมาณ 0.4-0.8 มิลลิกรัมของแข็งแขวนลอยระเหยง่ายต่อมิลลิกรัมของบีโอดีที่ถูกกำจัด (บุญชัย วิจิตรเสถียร, 2557)

ตารางที่ 2. ลักษณะของตะกอนจากระบบการบำบัดน้ำเสียแบบต่าง ๆ

พารามิเตอร์	ตะกอนขั้นต้น		ตะกอนจากระบบ ตะกอนเร่ง
	ช่วงค่า	ค่าทั่วไป	
Total dry solid (TS), %	5-9	6	0.8-1.2
Volatile solids (% of TS)	60-80	65	59-88
Protein (% of TS)	20-30	25	32-41
Nitrogen (N, % of TS)	1.5-4	2.5	2.4-5.0
Phosphorus (P ₂ O ₅ , % of TS)	0.8-2.8	1.6	2.8-11
Cellulose (% of TS)	8-15	10	-
pH	5.0-8.0	6.0	6.5-8.0
Alkalinity (mg/L as CaCO ₃)	500-1,500	600	580-1,100

ที่มา : (Metcalf, 2004)

2.2 การจัดการตะกอนส่วนเกินจากระบบบำบัดน้ำเสีย

2.2.1 การจัดการตะกอนส่วนเกินด้วยวิธีทางกายภาพและเคมี

2.2.1.1 การทำชั้นสลัดจ์ (Sludge Thickening)

การทำชั้นสลัดจ์เป็นขั้นตอนแรกของการบำบัดสลัดจ์ เพื่อเพิ่มความเข้มข้นสลัดจ์ และจะทำให้ปริมาตรลดลงจนเหมาะสมสำหรับการบำบัดในขั้นตอนต่อไป เช่น ถังย่อยสลัดจ์ (sludge digestion) เครื่องแยกน้ำจากสลัดจ์ (sludge dewatering) เป็นต้น การทำชั้นสลัดจ์มีหลายวิธี ได้แก่ การทำชั้นด้วยแรงโน้มถ่วง (gravity thickener) การลอยด้วยอากาศละลายหรือดีเอเอฟ (dissolved air floatation, DAF) และการหมุนเหวี่ยง (centrifugation) (กรมควบคุมมลพิษ, 2546)

1) **การทำชั้นด้วยแรงโน้มถ่วง** หลักการทำงานของถังทำชั้นด้วยแรงโน้มถ่วงคล้ายกับถังทำใส แต่มีข้อแตกต่างบางประการ ดังนี้ นอกจากถังทำชั้นด้วยแรงโน้มถ่วงจะมีเครื่องกวาดสลัดจ์แล้ว ยังมีการกวาดเศษขึ้นสลัดจ์อีกด้วย ซึ่งเป็นการไล่น้ำและก๊าซที่สะสมอยู่ระหว่างชั้นของสลัดจ์ (น้ำและอากาศจะลอยขึ้นสู่น้ำ) จึงทำให้สลัดจ์จมตัวได้ดี การกวาดสลัดจ์กระทำโดยติดตั้งเสากับแขนกวาดในแนวตั้ง ซึ่งเรียกว่า “พิกเก็ต” (picket) นอกจากนี้ถังทำชั้นด้วยแรงโน้มถ่วงจะมีความลาดชันมากกว่าถังทำใสอีกด้วย (กรมควบคุมมลพิษ, 2546)

2) **เครื่องหมุนเหวี่ยง** การทำชั้นแบบหมุนเหวี่ยงมีหลักการทำงานโดยการเพิ่มความเร่งในการจมตัวของสลัดจ์ด้วยการสร้างความโน้มถ่วงเทียมแทนแรงโน้มถ่วงของโลก การหมุนเหวี่ยงจะมีความเร่งประมาณ 500 – 3000 เท่าของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก เครื่องหมุนเหวี่ยงมีหลายประเภทแต่ประเภทที่ได้รับความนิยมที่สุด ได้แก่ โซลิด-โบล (solid bowl) ทำงานโดยที่โบล (bowl) และคอนเวเยอร์ (conveyer) หมุนด้วยความเร็วต่างกันเล็กน้อย ทำให้คอนเวเยอร์สามารถดึงสลัดจ์ที่มีความเข้มข้นออกจากเครื่องหมุนเหวี่ยงได้ โดยทำงานคล้ายกับใบกวาดสลัดจ์ของถังตกตะกอนส่วนน้ำที่ถูกแยกจากสลัดจ์จะไหลออกอีกด้านหนึ่งและจะถูกสูบกลับนำไปบำบัดใหม่ (กรมควบคุมมลพิษ, 2546)

2.2.1.2 การปรับเสถียรสลัดจ์ (sludge stabilization)

การปรับเสถียรสลัดจ์เป็นขั้นตอนที่ทำให้สลัดจ์มีความคงตัว ซึ่งเป็นการลดเชื้อโรคและป้องกันการเน่าเหม็นของสลัดจ์เมื่อนำไปกำจัดหรือใช้ประโยชน์ต่อไป ถ้าสลัดจ์ส่วนเกินมีความคงตัวแล้วก็สามารถข้ามขั้นตอนนี้ได้ เช่น สลัดจ์ส่วนเกินจากระบบเอเอสแบบการเติมอากาศ ยืดเวลา เป็นต้น การปรับเสถียรสลัดจ์มีหลายวิธี เช่น การย่อยแอโรบิก (aerobic sludge digestion) การย่อยแอนแอโรบิก (anaerobic sludge digestion) การหมักปุ๋ย (composting) เป็นต้น (กรมควบคุมมลพิษ, 2546)

2.2.1.3 การแยกน้ำจากสลัดจ์ (sludge dewatering)

การแยกน้ำจากสลัดจ์เป็นการเพิ่มความเข้มข้นและลดปริมาณของสลัดจ์ก่อนนำไปกำจัดขั้นสุดท้าย ซึ่งให้สะดวกในการขนย้ายและประหยัดค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ เช่น การขนส่ง ลดขนาดของพื้นที่สำหรับฝังกลบ เป็นต้น การแยกน้ำจากสลัดจ์มีหลายวิธี ได้แก่ ลานตากสลัดจ์ (sludge drying bed) สายพานรีดน้ำ (belt press) เครื่องอัดกรอง (filter press) และเครื่องหมุนเหวี่ยง (กรมควบคุมมลพิษ, 2546)

1) **ลานตากสลัดจ์** เป็นวิธีที่ง่าย ต้องการเครื่องจักรน้อย ไม่ซับซ้อน ประหยัดพลังงาน และมีค่าใช้จ่ายสำหรับการดำเนินระบบต่ำ เหมาะกับโรงปรับปรุงคุณภาพน้ำที่มีขนาดเล็ก แต่สลัดจ์ที่นำมาแยกน้ำต้องมีความคงตัว ถ้าสลัดจ์ที่นำมาแยกไม่คงตัวอาจทำให้เกิดปัญหาเรื่องกลิ่น นอกจากนี้ประสิทธิภาพการแยกน้ำขึ้นอยู่กับภูมิอากาศและมีข้อจำกัดในกรณีที่เป็นฤดูฝน ดังนั้นควรออกแบบลานตากสลัดจ์แบบมีหลังคา (กรมควบคุมมลพิษ, 2546)

2) **สายพานรีดน้ำ** เป็นการแยกน้ำจากสลัดจ์แบบใช้เครื่องกล ประกอบด้วยสายพาน 2 เส้น (เส้นบนและเส้นล่าง) โดยมีลูกกลิ้ง (baring) เป็นฐานรองรับและถูกขับเคลื่อนให้หมุนวนในทิศทางตรงข้ามกัน ซึ่งมีบางช่วงที่สายพานทั้งสองประกบกัน เมื่อสลัดจ์ผ่านการปรับสภาพแล้วถูกป้อนเข้าที่ช่วงแรกของสายพาน น้ำบางส่วนจะถูกแยกออกมาโดยการซึมผ่านสายพานด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก และเมื่อสายพานลำเลียงสลัดจ์ขึ้นผ่านเข้าช่วงที่สายพานทั้งสองประกบกันด้วยลูกกลิ้งบีบอัด น้ำจากสลัดจ์จะถูกบีบและซึมผ่านสายพาน ทำให้กากตะกอน (ที่ติดค้างอยู่บนสายพาน) ที่มีความเข้มข้นสูง เมื่อสายพานกลับถอยห่างออกจากกันอีกครั้ง ทำให้กากตะกอนหลุดออกและถูกระบายทิ้งต่อไป หลังจากการระบายตะกอนทิ้งแล้ว สายพานจะวนกลับไปรับสลัดจ์รอบใหม่ แต่ต้องมีหัวฉีดน้ำแรงดันสูงเพื่อล้างสายพานทั้งสองเส้นก่อนเพื่อป้องกันการอุดตันของสายพาน (กรมควบคุมมลพิษ, 2546)

3) **เครื่องอัดกรอง** เครื่องอัดกรองเป็นระบบที่มีราคาแพงและต้องการแรงอัดสูง ซึ่งทำงานแบบกะ (แบบแบตช์) และต้องใช้แรงงานคนในการนำกากตะกอนออกจากผ้ากรองอีกด้วย องค์ประกอบหลัก ๆ ของเครื่องอัดกรองประกอบด้วย แผ่นยึดผ้ากรองหลายอันเรียงกันบนแกนของเครื่อง ผ้ากรอง และเครื่องดันผ้ากรอง ขั้นตอนการทำงานเริ่มจากป้อนสลัดจ์ที่ปรับสภาพแล้วเข้าเครื่องอัดกรอง สลัดจ์จะเข้าไปในช่องว่างระหว่างผ้ากรองจนเต็มภายใต้ความดัน ขณะเดียวกันน้ำจะซึมผ่านผ้ากรอง ทำให้มีช่องว่างมากขึ้น และป้อนสลัดจ์ภายใต้แรงดัน จนกระทั่งไม่มีน้ำซึมผ่านผ้ากรองอีก จึงถอดแผ่นหรือเลื่อนแผ่นยึดผ้ากรองออกจากกันและแกะกากตะกอนออกจากแผ่นกรอง (กรมควบคุมมลพิษ, 2546)

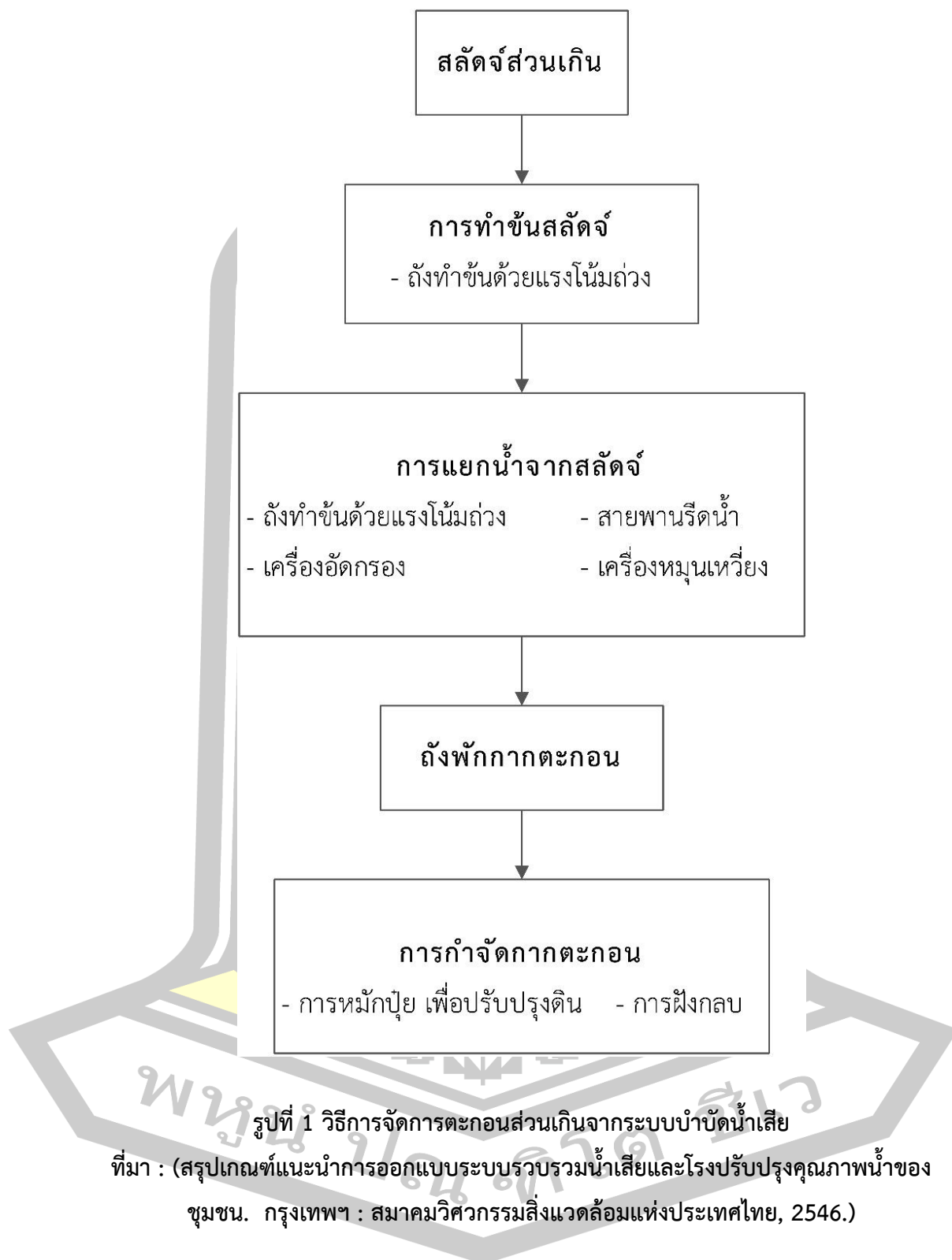
2.2.1.4 การกำจัดสลัดจ์

การกำจัดสลัดจ์ คือ การนำสลัดจ์ที่ผ่านการบำบัดในขั้นตอนต่าง ๆ ข้างต้นแล้วไปใช้ประโยชน์ เช่น ปรับสภาพดินสำหรับการเกษตร เป็นต้น ซึ่งเป็นวิธีกำจัดในหลายประเทศ เช่น เยอรมัน ออสเตรเลีย อิตาลี เป็นต้น หรือนำไปฝังกลบอย่างถูกหลักสุขาภิบาล (กรมควบคุมมลพิษ, 2546)

ตารางที่ 3 ลักษณะคุณสมบัติทางเคมีของตะกอนจากการทบทวนงานวิจัย

พารามิเตอร์	(Xiao et al., 2014)	(Jiang et al., 2011)	(Karthikeyan et al., 2016)	(X. Zhang et al., 2019)
pH	7.9	6.9	7.24	7.4
COD, mg/L			14,210	
TCOD, mg/L	4,860	12,300		13629.8
SCOD, mg/L	1,120	220		73.2
TS, mg/L		9,270	15,900	
VS, mg/L		7,410		
TDS, mg/L			13,300	
SS, mg/L				12,330
TSS, g/L	6.57			
VSS, g/L	3.81			8080

พหุ ประถมศึกษา ชีวะ

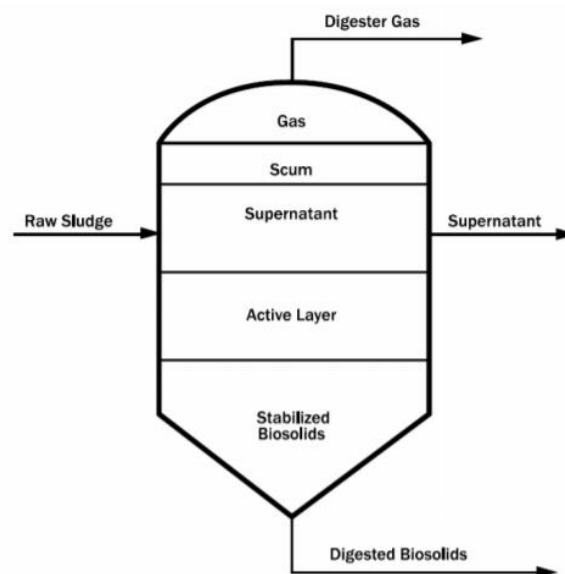


2.2.2 การจัดการตะกอนส่วนเกินด้วยวิธีทางชีวภาพ

หลักการการทำงานของระบบย่อยแบบไม่ใช้อากาศจะอาศัยจุลินทรีย์ที่ไม่ใช้ออกซิเจนย่อยสลายอนุภาคอินทรีย์หรือเซลล์จุลินทรีย์ ตะกอนที่ย่อยสลายแล้วจะจมตัวและถูกระบายทิ้งที่ก้นถัง ส่วนของเหลวส่วนบนจะล้นออกที่ด้านบนของถัง ในบางกรณีอาจมีให้ความร้อนและการกวนผสมในถังด้วย เพื่อเพิ่มอัตราเร็วในการย่อยสลาย ซึ่งทำให้เวลาในการบำบัดตะกอนน้อยลง กระบวนการบำบัดตะกอนมักเป็นถังรูปแบบเดียว คือ ถังย่อยสลัดจ์ (Sludge Digestion Tank)

2.2.2.1 ถังย่อยสลัดจ์แบบอัตราต่ำ (Low Rate Digester)

การย่อยแบบอัตราต่ำเป็นวิธีที่เก่าแก่และง่ายที่สุด กระบวนการย่อยตะกอนแบบไร้อากาศ โดยพื้นฐานแล้วมันเป็นถังรูปทรงกระบอกขนาดใหญ่ที่มีด้านล่างลาดและหลังคาแบนหรือโดม แหล่งความร้อนภายนอกอาจมีหรือไม่มีก็ได้ ไม่มีการกวนผสม ตะกอนซึ่งสะสมที่ด้านล่างของถังถูกดึงออกมาเป็นระยะเพื่อการกำจัด การย่อยในอัตราที่ต่ำเป็นมีระยะเวลาที่เก็บที่ยาวนานเวลา 30 ถึง 60 วัน ดังรูปที่ 2

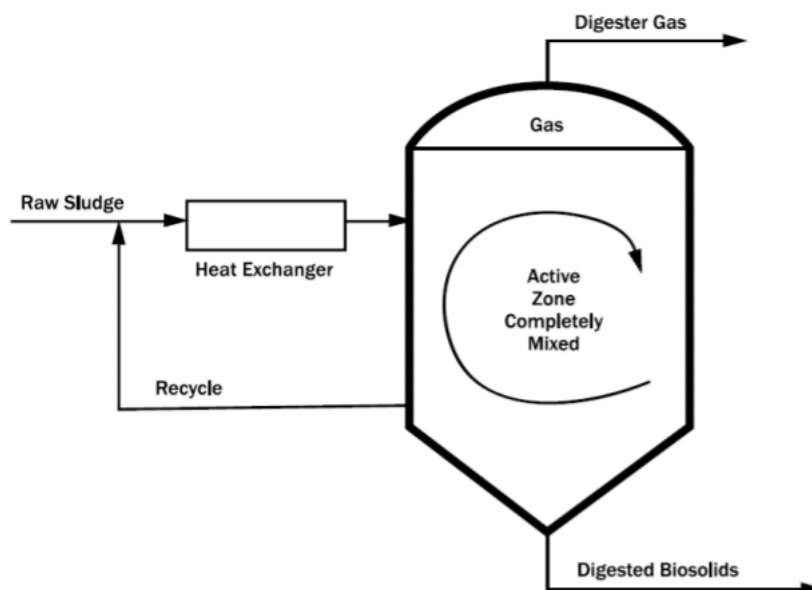


รูปที่ 2 ถังย่อยสลัดจ์แบบอัตราต่ำ

ที่มา : (มันลีน ตันจุลเวศม์, 2542)

2.2.2.2 ถังย่อยสลายแบบอัตราสูง (High Rate Digester)

การปรับปรุงหลายอย่างสำหรับถังย่อยสลายแบบอัตราต่ำได้รับการพัฒนา ได้แก่ การให้ความร้อน, การกวนผสม, ความชื้นของตะกอนดิบ และการให้อาหารอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งที่กล่าวมาเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของถังย่อยสลายแบบอัตราที่สูง เป็นผลให้ปริมาณถังลดลงและกระบวนการย่อยมีประสิทธิภาพมากขึ้น ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ถังย่อยสลายแบบอัตราสูง
ที่มา : (มันสิน ตันจุลเวศม์, 2542)

นอกจากนี้การย่อยแบบอัตราเร็วสามารถแบ่งตามช่วงอุณหภูมิในถังย่อยได้อีก 2 แบบ ได้แก่ การย่อยช่วงเมโซฟิลิก (Mesophilic Range) และการย่อยช่วงเทอร์มอฟิลิก (Thermophilic Range) ซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ 30 - 38 และ 50 - 60 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยปกติการย่อยในช่วงเทอร์มอฟิลิกมีอัตราการย่อยตะกอนและการฆ่าเชื้อโรคสูงกว่าการย่อยในช่วงเมโซฟิลิก นอกจากนี้ยังทำให้ตะกอนที่ย่อยแล้วสามารถแยกน้ำจากตะกอนได้ง่ายกว่าอีกด้วย แบบคที่เรียที่เป็นตัวสร้างมีเทนเจริญเติบโตได้ช้าและสภาพแวดล้อมมีผลต่อการเจริญเติบโตค่อนข้างมาก ช่วงค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการทำงานของแบบคที่เรีย โดยสามารถเจริญเติบโตได้ดีในช่วงพีเอชประมาณ 6.8-7.4 (Appels et al., 2008)

2.2.3 หลักการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้อากาศ

การย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะแบบแอนแอโรบิกเป็นการเปลี่ยนรูปสารอินทรีย์ไปเป็นก๊าซชีวภาพ (Biogas) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ โดยมีขั้นตอนการย่อยสลายแบบแอนแอโรบิก และมีรายละเอียดขั้นตอนการย่อยสลาย 4 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นที่ 1 ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ (Hydrolysis) โดยอาศัยเอนไซม์ (enzyme) ที่ถูกส่งออกมาจากเซลล์ เพื่อเปลี่ยนสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ให้เป็นสารโมเลกุลเล็ก เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีนและไขมัน เช่น น้ำตาล กรดอะมิโนและกรดไขมัน เพื่อให้แบคทีเรียสามารถน้ำเข้าไปใช้ภายในเซลล์ได้

ขั้นที่ 2 ขั้นตอนการสร้างกรด (Acidogenesis) โดยแบคทีเรียสร้างกรด ซึ่งจะเปลี่ยนผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสในขั้นที่ 1 ไปเป็นกรดไขมันระเหย (volatile fatty acid; VFA) เช่น กรดอะซิติก (Acetic acid) กรดโพรไพโอนิก (Propionic acid) กรดบิวไทริก (Butyric acid) เป็นต้น

ขั้นที่ 3 ขั้นตอนการเปลี่ยนกรดอินทรีย์เป็นกรดอะซิติก (Acetogenesis) โดยแบคทีเรียกลุ่มอะซิโตเจนิค (acetogenic bacteria) จะเปลี่ยนกรดไขมันระเหย ไปเป็นผลผลิตสำคัญในการสร้างก๊าซมีเทน ได้แก่ กรดอะเซติก กรดฟอร์มิก ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซไฮโดรเจน เช่น กรดอะเซติก กรดฟอร์มิก ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซไฮโดรเจน

ขั้นที่ 4 ขั้นตอนการสร้างมีเทน (Methanogenesis) โดยผลผลิตที่ได้จากแบคทีเรียสร้างกรดในขั้นที่ 3 จะถูกเปลี่ยนไปเป็นก๊าซมีเทนโดยแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทน (methanogenic bacteria) แบคทีเรียกลุ่มที่สร้างมีเทนนี้ แบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด ชนิดแรก คือ แบคทีเรียที่สร้างมีเทนจากคาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจน (hydrogenotrophic bacteria) โดยได้คาร์บอนมาจากคาร์บอนไดออกไซด์และได้พลังงานจากไฮโดรเจน ชนิดที่สอง คือ แบคทีเรียที่สร้างมีเทนจากกรดอะซิติก (acetotrophic bacteria) ซึ่งใช้อะเซเตตเป็นตัวรับอิเล็กตรอน และใช้ไฮโดรเจนเป็นแหล่งพลังงาน

2.2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์

2.2.4.1 ระยะเวลาที่กักขังคลาสร (Hydraulic Retention Time)

ระยะเวลาในการกักเก็บสารอินทรีย์ในถังหมักขึ้นอยู่กับปริมาณ และประเภทของสารอินทรีย์ที่เติมเข้าไปซึ่งมีลักษณะและคุณสมบัติที่แตกต่างกันไป รวมถึงรูปแบบของระบบหรือถังหมัก หากระยะเวลาในการกักเก็บสั้นไปก็จะมีผลต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย ทำให้แบคทีเรียที่เหลืออยู่ทำการย่อยไม่ทันและอาจทำให้ค่าพีเอชในถังหมักลดลง และการที่

ระยะเวลาที่เก็บนานเกินไปจะทำให้เกิดตะกอนของสารอินทรีย์ที่แบคทีเรียย่อยสลายแล้วสะสมอยู่ ทำให้ถึงหมัก ระยะเวลาในการเก็บส่วนใหญ่จะประมาณ 14- 60 วัน ระยะเวลาในการเก็บนั้นเป็นตัวบ่งชี้ว่าแบคทีเรียจะมีชีวิตได้นานเท่าไรโดยไม่มี การเติมอาหาร เนื่องจากระยะเวลาการเก็บนั้นหมายถึงระยะเวลาที่แบคทีเรียต้องการเพื่อย่อยอาหารให้หมด ดังนั้นเมื่อไรก็ตามที่แบคทีเรียยังย่อยอาหารไม่หมดก็หมายความว่าแบคทีเรียจะยังไม่ตายจากการขาดอาหาร (พลกฤษณ์ คุ่มกล้า, 2557)

2.2.4.2 อุณหภูมิ (Temperature)

เมทาโนเจน ไม่สามารถทนต่ออุณหภูมิที่ต่ำมากหรือสูงมากได้ ถ้าหากอุณหภูมิลดต่ำกว่า 10 องศาเซลเซียส แบคทีเรียจะหยุดทำงาน อุณหภูมิในการเดินระบบแบ่งเป็นสองระดับตามสปีชีส์ของเมทาโนเจน ได้แก่ เมโซฟิลิก (Mesophilic) และเทอร์โมฟิลิก (Thermophilic) อุณหภูมิที่เหมาะสมที่เมโซฟิลิก ทำงานได้ดี คือ ประมาณ 20 - 45 องศาเซลเซียส แต่ที่เหมาะสมที่สุด คือ ช่วง 37 - 41 องศาเซลเซียส โดยในช่วงอุณหภูมิระดับนี้แบคทีเรียส่วนใหญ่ในถังหมักจะเป็นเมโซฟิลิก เทอร์โมฟิลิกจะทำงานได้ดีในช่วงอุณหภูมิที่สูงกว่า โดยอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดคือประมาณ 50 - 52 องศาเซลเซียส แต่ก็สามารถทำงานในอุณหภูมิที่สูงขึ้นไปถึง 70 องศาเซลเซียส แบคทีเรียเมโซฟิลิกนั้นมีจำนวนสปีชีส์มากกว่าเทอร์โมฟิลิก นอกจากนี้ยังสามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมได้ดีกว่าเทอร์โมฟิลิกอีกด้วย ทำให้ระบบที่ใช้เมโซฟิลิก เสถียรกว่า (พลกฤษณ์ คุ่มกล้า, 2557)

2.2.4.3 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

ค่าพีเอช ที่เหมาะสม คือ ระหว่าง 7.0 - 7.2 เพราะในช่วงแรกแบคทีเรียที่สร้างกรดจะสร้างกรดเป็นจำนวนมากและทำให้ค่าพีเอชลดลง ซึ่งถ้าหากพีเอชลดลงต่ำกว่า 5 ก็ จะหยุดกระบวนการย่อยทั้งหมดหรืออีกนัยหนึ่งก็คือแบคทีเรียตาย เมทาโนเจน นั้นอ่อนไหวต่อความเป็นกรดต่างมาก และจะไม่เจริญเติบโตหากพีเอชต่ำกว่า 6.5 ในช่วงท้ายของกระบวนการ ความเข้มข้นของแอมโมเนีย จะมากขึ้นตามการย่อยสลายไนโตรเจนที่เพิ่มขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้ค่าพีเอชเพิ่มโดยอาจเกิน 8 จนกระทั่งระบบผลิตเริ่มมีความเสถียร พีเอช จะอยู่ระหว่าง 6.8 - 8 (พลกฤษณ์ คุ่มกล้า, 2557)

2.2.4.4 ธาตุอาหาร (Nutrient)

สารอาหารที่แบคทีเรียต้องการเพื่อการเจริญเติบโต นอกเหนือไปจากคาร์บอนและไฮโดรเจนแล้ว ยังมี ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ ฟอสฟอรัส โปแตสเซียม แคลเซียม เป็นต้น (พลกฤษณ์ คุ่มกล้า, 2557)

2.2.4.5 การกวน (Mixing)

การคลุกเคล้าตะกอน น้ำ และ สารอินทรีย์ เป็นส่วนที่สำคัญอีกส่วนเพราะจะทำให้แบคทีเรียสัมผัสกับสารอินทรีย์ได้อย่างทั่วถึง ทำให้แบคทีเรียทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น นอกจากนี้ยังป้องกันการตกตะกอนและตะกอนลอย(Scum) ซึ่งตะกอนอาจจะไปอุดช่องทางสำหรับระบายของเหลวจากถัง (พลกฤษณ์ คุ่มกล้า, 2557)

ตารางที่ 4 ธาตุอาหารรองที่มีผลต่อการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกาศ

องค์ประกอบ	ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)
เหล็ก (Fe^{2+})	0.2
นิกเกิล (Ni^{2+})	0.017-0.006
แมกนีเซียม (Mg^{2+})	0.01-0.02
แคลเซียม (Ca^{2+})	0.01-0.04
แบเรียม (Ba^{2+})	0.01-0.1
โคบอลท์ (Co^{2+})	0.003
ซัลเฟต (SO_4^{2-})	0.02

ที่มา : (วีระวุฒิ ทองบริบูรณ์, 2550)

2.3 เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์

2.3.1 นิยามของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์

อิเล็กทรอนิกส์ที่เกิดจากการย่อยสลายสารอาหารของเชื้อจุลินทรีย์เกิดขึ้นมานานหลายศตวรรษซึ่งในสมัยก่อนยังเป็นไปได้ยาก แต่ในปัจจุบันพบว่านักวิทยาศาสตร์สามารถนำมาใช้เป็นแหล่งพลังงานที่ใช้ในนาฬิกาและกล้องถ่ายรูป หลังจากนั้นในปี ค.ศ. 1790 ลู แกวานี่ เป็นบุคคลแรกที่ค้นพบการผลิตกระแสไฟฟ้าจากสิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก ซึ่งเรียกว่า เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ (Microbial Fuel Cell; MFC) และได้เรียกเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพตั้งแต่นั้นเป็นต้นมา ในปี ค.ศ. 1910 Michael Gress Potter เป็นศาสตราจารย์ที่ได้ทำงานด้านพฤกษศาสตร์แห่งมหาวิทยาลัย Durham ในประเทศอังกฤษ สาธิตให้ดูว่าเชื้อจุลินทรีย์สามารถสร้างแรงดันไฟฟ้าและส่งกระแสไฟฟ้าจากเชื้อ Escherichia coli และยีสต์สายพันธุ์ Saccharomyces cerevisia แต่การผลิตไฟฟ้าจาก MFC ของ Potter ยังไม่ประสบความสำเร็จมากนัก เนื่องจากปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้มีปริมาณน้อย หลังจากนั้น Cohen ปี ค.ศ. 2931 ได้สานต่อแนวความคิดของ Potter ได้อธิบายว่าเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพสร้างกระแสไฟฟ้าจากการย่อยสลายอาหารของเชื้อจุลินทรีย์ ซึ่งในงานวิจัยของ Cohen สามารถผลิตความต่างศักย์จาก MFC ฟังได้รับความนิยมนในปี ค.ศ. 1960 ในช่วงองค์การนาซ่า (NASA) ได้ให้ความสนใจในการเปลี่ยนของเสีย

จากอินทรีย์สารให้เป็นกระแสไฟฟ้าสำหรับใช้ในยานอวกาศ โดยเลือกใช้สาหร่ายและแบคทีเรียเป็น สิ่งมีชีวิตขนาดเล็กกลุ่มแรกๆ ที่ถูกนำมาใช้ใน MFC ในช่วงกลางศตวรรษที่ 19 Rohrbach และคณะ ได้ออกแบบ MFC โดยนำเชื้อจุลินทรีย์สายพันธุ์ *Clostridium bityricum* มาใช้เพื่อผลิตอิเล็กตรอน จากกระบวนการหลักกลูโคส จากนั้นในปี ค.ศ. 1963 เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพถูกนำมาออกมาจำหน่ายใน ท้องตลาดเพื่อนเป็นแหล่งพลังงานที่ใช้ในวิทยุ ในการส่งสัญญาณและอุปกรณ์อื่น ๆ ที่ใช้ในเรือเดิน ทะเล แต่ในช่วงเวลานั้น MFC เหล่านั้นก็ยังไม่ประสบความสำเร็จในเชิงพาณิชย์เท่าที่ควร จึงทำให้เกิด การลดหายไปจากตลาด ซึ่งไม่เหมือนกับการพัฒนาเทคโนโลยีทางเลือกอื่น ๆ (กันยรัตน์ โทละสุด, 2554)

2.3.2 ประเภทของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์

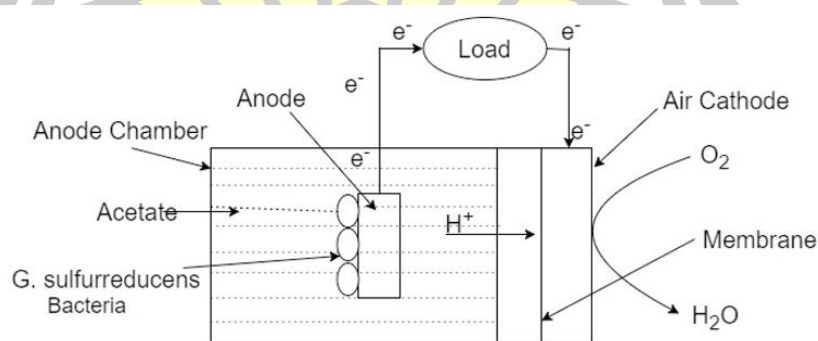
2.3.2.1 เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดียว

จะออกแบบง่ายและมีต้นทุนต่ำกว่าแบบห้องคู่โดยจะมีแค่ส่วนแอโนดจะ แบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ

1) เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบใช้เมมเบรน จะประกอบด้วยส่วนแอโนดอยู่ใน Reactor ส่วนแคโทดอยู่ด้านนอก โดยมีเยื่อเลือกผ่านโปรตอนเป็นตัวเชื่อมอิเล็กตรอนจะถูกสร้างขึ้น เนื่องจากสารตั้งต้นและจุลินทรีย์ ซึ่งสามารถถ่ายโอนไปยังขั้วแคโทดผ่านวงจรไฟฟ้า โปรตอนจะถูกส่ง จากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทดผ่านเมมเบรน โดยใช้สารตั้งต้นเดียว และ *G.sulfurreducens* เป็น แบคทีเรียในปฏิกิริยาของขั้วแอโนดและแคโทด (Patel & Deb, 2018) ดังสมการนี้



2) เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบไม่ใช้เมมเบรน ใน Reactor ประกอบด้วย แอโนดติดตั้งไว้ในส่วนล่างที่มีจุลินทรีย์ แคโทดอยู่ส่วนบนที่ไม่มีจุลินทรีย์



รูปที่ 4 เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้องเดียว

ที่มา : (Patel & Deb, 2018)

2.3.2.2 เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้องคู่

จะประกอบไปด้วย แอโนดและแคโทดจะถูกแบ่งโดยเยื่อเลือกผ่านโปรตอนเป็นตัวนำโปรตอน แต่ไม่ยอมให้ออกซิเจนเคลื่อนที่ผ่านมาด้วย

2.3.3 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์

อิเล็กตรอนที่สร้างขึ้นจะถูกส่งไปยังแคโทด และจะมีการไหลเวียนของกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้น แล้วอิเล็กตรอนจะถูกออกซิไดซ์แล้วขนถ่ายไปที่ขั้วแอโนด โดยส่วนประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์มี 2 ส่วน คือ แคโทดและแอโนด โดยจะมีตัวแยกคือเยื่อเลือกผ่านโปรตอน

2.3.3.1 ส่วนแอโนด

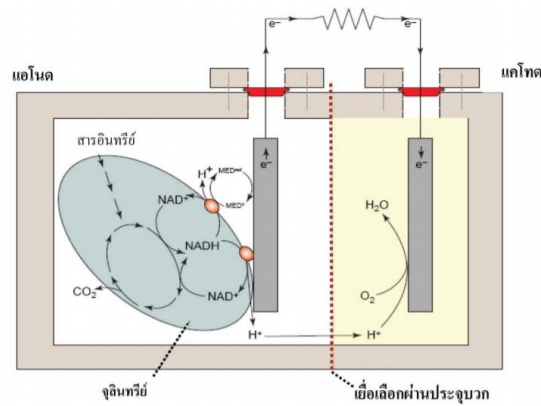
จะเป็นส่วนที่เกิดกระบวนการย่อยสลายของสารอินทรีย์จะประกอบไปด้วยเชื้อจุลินทรีย์ โดยจะใช้เชื้อจุลินทรีย์ที่อยู่ในกลุ่มย่อยสารประกอบมีเทนและผลิตไฮโดรเจน โดยจะทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีมีเทนและไฮโดรเจนเพื่อสร้างพลังงานกระบวนการหมักและยังผลิตไฟฟ้าไปด้วย ดังสมการต่อไปนี้ (Moqsud et al., 2013)



ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในส่วนของแอโนด (Anode reaction) บทบาทสำคัญของซับสเตรท (Substrate) ในการผลิตกระแสไฟฟ้าของ MFC ซึ่งซับสเตรทจะต้องมีความสามารถในการผลิตกระแสไฟฟ้า ได้สูงกว่าน้ำตาลทั่วไปกระแสไฟฟ้าที่วัดได้ในหน่วยของคูลอมบิก (Coulombic) เกิดจากการผลิตอิเล็กตรอนจากซับสเตรทและการขนส่งอิเล็กตรอนไปยังขั้วอิเล็กโทรด การเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายกลูโคสของเชื้อจุลินทรีย์และจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ซึ่งใน 1 วินาทีกระบวนการออกซิเดชันของเชื้อจุลินทรีย์จะสามารถผลิตประจุไฟฟ้าได้ดังสมการ

$$C = n \times F$$

เมื่อ C คือ ประจุไฟฟ้า (Coulombic), n คือ จำนวนอิเล็กตรอน, และ F คือค่าคงที่ของฟาราเดย์ (Faraday constant = 96,485 C/mole)



รูปที่ 5 เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้องคู่

ที่มา : (เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์กับการบำบัดน้ำเสีย วารสารสิ่งแวดล้อม ปีที่ 16 เล่ม 2 สถาบันวิจัยสภาวะสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

กระบวนการออกซิเดชันแหล่งพลังงานในส่วนแอโนดจะเกิดจาก 2 ปัจจัย คือ อัตราการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนของกระบวนการเมตาบอลิซึมที่เกิดภายในเซลล์ของเชื้อจุลินทรีย์ และเกิดจากปัจจัยอื่น ๆ ได้แก่ขนาดของ MFC สภาพที่ทำการศึกษทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของพลังงานทางชีวเคมีของกระบวนการเมตาบอลิซึมของเชื้อจุลินทรีย์

ตารางที่ 5 Standard Potentials E_0 and Theoretical Potentials for Typical Conditions in MFC

Electrode	Reaction	E_0 (V)	Conditions	E_{MFC} (V)
Anode	$2\text{HCO}_3^- + 9\text{H}^+ + 8e^- \rightarrow \text{CH}_3\text{COO}^- + 4\text{H}_2\text{O}$	0.187	$\text{HCO}_3^- = 5 \text{ mM}, \text{CH}_3\text{COO}^- = 5 \text{ mM}, \text{pH} = 7$	-0.296
Cathode	$\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4e^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	1.229	$\text{pO}_2 = 0.2, \text{pH} = 7$	0.805
	$\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4e^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	1.299	$\text{pO}_2 = 0.2, \text{pH} = 10$	0.627
	$\text{MnO}_2(\text{s}) + 4\text{H}^+ + 2e^- \rightarrow \text{Mn}_2^+ + 2\text{H}_2\text{O}$	1.23	$[\text{Mn}^{2+}] = 5 \text{ mM}, \text{pH} = 7$	0.470
	$\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2e^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}_2$	0.695	$\text{pO}_2 = 0.2, [\text{H}_2\text{O}_2] = 5 \text{ mM}, \text{pH} = 7$	0.328
	$\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-} + e^- \rightarrow \text{Fe}(\text{CN})_6^{4-}$	0.361	$[\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-}] = [\text{Fe}(\text{CN})_6^{4-}]$	0.361

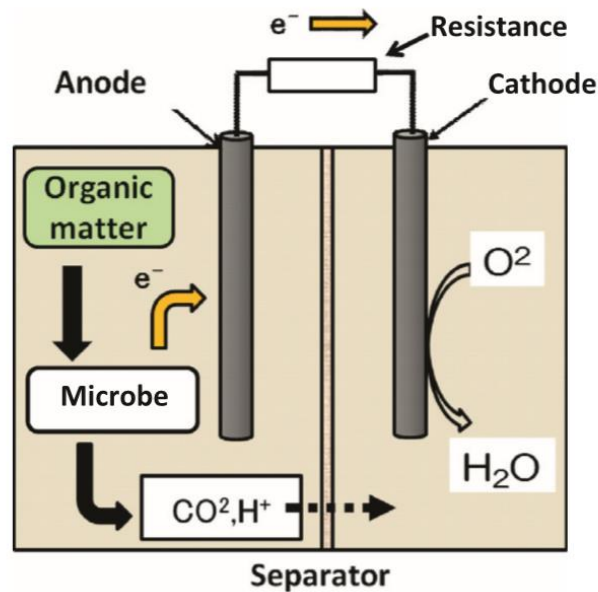
ที่มา : (Logan et al., 2006)

2.3.3.2 ส่วนแคโทด

ประกอบด้วยขั้วแคโทด สารละลายแคโทโรไลต์ เยื่อเลือกผ่านโปรตอน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ ในส่วนแอโนดเกิดปฏิกิริยารีดักชัน ซึ่งเป็นการเพิ่ม H^+ ให้กับสารละลาย ในส่วนแคโทดจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน เป็นการให้ H^+ กับสารละลาย ดังสมการต่อไปนี้ (Moqsud et al., 2013)



ปฏิกิริยาส่วนแคโทด (Cathode reaction) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่ในส่วนของแคโทดของ MFC ซึ่งส่วนใหญ่ที่ไม่มีเชื้อจุลินทรีย์ แต่จะประกอบด้วยปฏิกิริยารีดักชันของสารละลายแคโทโรไลต์ ซึ่งเป็นที่นิยมเลือกใช้ คือ ออกซิเจน หรือ Ferricyanide ในการศึกษาจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเร็วหรือหมดสภาพเร็ว (การเสื่อมสภาพทางเคมี) อย่างไรก็ตามออกซิเจนก็มีข้อเสียเช่นกัน คือ ออกซิเจนจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันกับขั้วอิเล็กโทรดได้ช้า ปฏิกิริยารีดักชันมีส่วนสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าของ MFC ซึ่งประสิทธิภาพในการรีดิวซ์อิเล็กตรอนจะขึ้นกับหลายปัจจัยได้แก่ อัตราการป้อนออกซิเจนในส่วนแคโทดชนิดสารละลายแคโทโรไลต์ ขนาดกำเนิดไฟฟ้า ขนาดขั้วแคโทดและสถานะอื่นๆที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของเชื้อจุลินทรีย์ เป็นต้น



รูปที่ 6 ปฏิกิริยาภายในห้องแอโนดและห้องแคโทด

ที่มา : (Moqsud et al., 2013)

2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์

2.4.1 ขั้วไฟฟ้า

1) ชนิดของวัสดุทำขั้วไฟฟ้า การใช้วัสดุขั้วไฟฟ้าที่ทำงานได้ดีสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ให้ดีขึ้นเพราะวัสดุขั้วแอโนดที่แตกต่างกันมีผลกระตุ้นให้เกิดโพลาริเซชันที่แตกต่างกัน มีวัสดุหลายชนิดที่ถูกนำมาใช้เป็นขั้วแอโนด เช่น แท่ง กราไฟท์ ฝ้ายคาร์บอน กระดาษคาร์บอน และแผ่นกราไฟท์ (ชลธิศา สุขเกษม, 2554)

2) ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า การลดความต้านทานภายในของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์สามารถทำได้โดยการลดระยะห่างระหว่างขั้วแอโนดและขั้วแคโทด และการเลือกวัสดุที่เหมาะสม (ชลธิศา สุขเกษม, 2554)

3) พื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้า พลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เมื่อพื้นที่ผิวขั้วแคโทดเพิ่มขึ้นและพลังงานไฟฟ้าลดลง เมื่อพื้นที่ผิวขั้วแคโทดลดลง (Oh et al., 2004)

2.4.2 การสูญเสียความต่างศักย์ไฟฟ้า

การสูญเสียความต่างศักย์ไฟฟ้าขึ้นอยู่กับความหนาแน่น ของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขั้วแอโนด คุณสมบัติทางเคมีไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้า การมี อยู่ของสาร สื่อกกลางและอุณหภูมิ (Logan et al., 2006) ความต่างศักย์ไฟฟ้าอาจมีการสูญเสียในระหว่างการผลิต อิเล็กตรอน ผ่านตัวต้านทานภายนอกและภายใน ซึ่งความต้านทานภายในมักเกิดจากกระบวนการถ่ายเทอิเล็กตรอนจากตัวจุลินทรีย์สู่ขั้วไฟฟ้า การสูญเสียอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในกระบวนการขนส่งอิเล็กตรอนในเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ โดยที่มีการสูญเสียในขั้นตอนต่างๆ คือ (1) การถ่ายเท อิเล็กตรอนจากตัวจุลินทรีย์ (2) ความต้านทานของสารอิเล็กโทรไลต์ (3) ขั้วแอโนด (4) เมมเบรน (5) ขั้วแคโทด และ (6) การรับอิเล็กตรอนโดยออกซิเจน ซึ่งต้องพิจารณาให้เหมาะสมจึงจะทำให้ได้ พลังงานไฟฟ้าที่มากเพียงพอต่อการใช้งาน เช่น การปรับให้ขั้วแอโนดและขั้วแคโทดเข้าใกล้กันที่สุดเท่าที่จะทำได้ อย่างไรก็ตามการสูญเสียค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าขึ้นอยู่กับความต้านทานภายนอกเป็นหลัก (ชลธิศา สุขเกษม, 2554)

2.4.3 อุณหภูมิ

เป็นที่ทราบกันว่าอุณหภูมิมีผลต่อกิจกรรมของแบคทีเรียในการผลิต กระแสไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้องเดี่ยว พบว่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงเมื่อมีอุณหภูมิสูงทำให้ศักย์ไฟฟ้าของขั้วแคโทดสูงขึ้น (ชลธิศา สุขเกษม, 2554)

2.4.4 พีเอช

ค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมในการผลิต H_2 คือพีเอช 5.5 จะมีผลต่อรูปแบบของกรดที่ผลิตในระหว่างการผลิตไฮโดรเจน ความเข้มข้นของกรดอะซิติก หรือกรดบิวทีริกในรูปที่ไม่แตกตัวจะเกิดที่พีเอช 4.5 มากกว่าที่พีเอช 5.5 ดังนั้นกรดรูปแบบที่ไม่แตกตัวที่มีมากที่พีเอชต่ำ จะทำให้เกิดการยับยั้งการผลิตไฮโดรเจน (ชลธิศา สุขเกษม, 2554)

2.4.5 เมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange Membrane : PEM)

โดยปกติ แล้วขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทดจะถูกแยกออกจากกันโดยเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน ซึ่งจะยอมให้มีการถ่ายโอนของโปรตอนจากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทด และช่วยป้องกันการแพร่ของออกซิเจนเข้าไป ในห้องขั้วแอโนด เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ที่ไม่ใช้เมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนมีกำลังไฟฟ้าสูงกว่าเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ที่ใช้เมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (ชลธิศา สุขเกษม, 2554)

2.4.6 สารสื่อกลาง (Mediator)

เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ที่ใช้จุลินทรีย์ทั่วไปจะต้องการสาร สื่อกลางในการถ่ายโอนอิเล็กตรอนจากระบบการถ่ายโอนอิเล็กตรอนของจุลินทรีย์ไปยังขั้วไฟฟ้า สารสื่อกลางชนิดต่างกัน จะทำให้กำลังไฟฟ้าต่างกันด้วย (ชลธิศา สุขเกษม, 2554)

2.4.7 อัตราการให้อากาศ

อัตราการให้อากาศที่มากเกินไปจะไปรบกวนการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ ค่ากระแสไฟฟ้าต่ำลง (ชลธิศา สุขเกษม, 2554)

2.4.8 อัตราการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของสารตั้งต้น

อัตราการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของสาร ตั้งต้นก็มีผลต่อการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ ซึ่งขึ้นกับชนิดของสารตั้งต้นปริมาณของจุลินทรีย์ภายในเซลล์จลนพลศาสตร์ของจุลินทรีย์ ปริมาณออกซิเจน รวมถึงอัตราการระบรทุก (Organic Loading Rate : OLR) และระยะเวลาเก็บกักน้ำเสียในระบบ (Hydraulic Retention Time : HRT) (Rabaey et al., 2003) ที่เหมาะสมต่อการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์จะช่วยให้สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าและบำบัดสารอินทรีย์ได้ดี (ชลธิศา สุขเกษม, 2554)

2.4.9 การเกิดก๊าซมีเทน

การผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากน้ำเสียเกิดจากการบำบัดแบบไม่ใช้แสง การสร้างก๊าซไฮโดรเจนด้วยกระบวนการทางชีวภาพต้องใช้ทรัพยากรร่วมจากการผลิตก๊าซมีเทนในระบบหมักแบบไร้อากาศ ซึ่งเป็นการทำงานแบบผสมผสานของจุลินทรีย์สองกลุ่มในสองกระบวนการทางชีวเคมี ดังนั้นการยับยั้งการใช้ทรัพยากรร่วมจึงมีความสำคัญ การสร้างไฮโดรเจนต้อง ยับยั้งกลุ่มที่ใช้ไฮโดรเจน เช่น กลุ่ม Homoacetogens และกลุ่ม Methanogens (ชลธิศา สุขเกษม, 2554)

2.5 ทฤษฎีไฟฟ้าเบื้องต้น

กฎของโอห์มเป็นกฎของความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า แรงเคลื่อนไฟฟ้า และความต้านทาน โดยวงจรไฟฟ้าใดๆ ค่ากระแสผันตรงกับแรงดันไฟฟ้า และจะแปรผกผันกับความต้านทาน ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.5.1 กระแสไฟฟ้าของโอห์ม

กระแสไฟฟ้าที่นำพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าไปยังส่วนที่ต้องการใช้ไฟฟ้ามีหน่วยเป็นแอมแปร์ (Ampere) โดยกระแสไฟฟ้าจะผันตรงกับค่าแรงดันไฟฟ้าและจะแปรผกผันตรงกับค่าความต้านทานไฟฟ้า ดังสมการ

$$I = V / R$$

2.5.2 กฎแรงดันไฟฟ้าของโอห์ม

พลังงานไฟฟ้าที่สูญเสียไประหว่างจุด 2 จุด มีหน่วยเป็นโวลต์ (Voltage) ถ้าความต้านทานภายในเซลล์ไฟฟ้า ค่าของแรงเคลื่อนไฟฟ้าจะมีค่าเท่ากับความต่างศักย์ภายนอกเซลล์แรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นและตกคร่อมอุปกรณ์ไฟฟ้าใด ๆ ซึ่งแรงดันไฟฟ้าจะมีค่าเท่ากับผลคูณของกระแสไฟฟ้ากับความต้านทานของอุปกรณ์นั้น แรงดันไฟฟ้าจะแปรผันตรงกับค่ากระแสไฟฟ้าและแปรผันตรงกับค่าความต้านทานไฟฟ้า ดังสมการ

$$V = IR$$

2.5.3 กฎความต้านทานของโอห์ม

สมบัติของตัวนำไฟฟ้าที่ยอมให้กระแสไหลผ่านได้มากหรือน้อยต่างกัน มีหน่วยเป็นโอห์ม (Ω) ความต้านทาน 1 โอห์ม คือ ความต้านทานของตัวนำเมื่อต่อปลายทั้งสองขั้วกับความต่างศักย์ 1 โวลต์ และมีกระแสไหลผ่านตัวนำนั้น 1 แอมแปร์ ดังนั้นค่าความต้านทานไฟฟ้าเป็นอัตราส่วนระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวต้านทานกับค่าของกระแสไฟฟ้า ดังสมการ

$$R = V / I$$

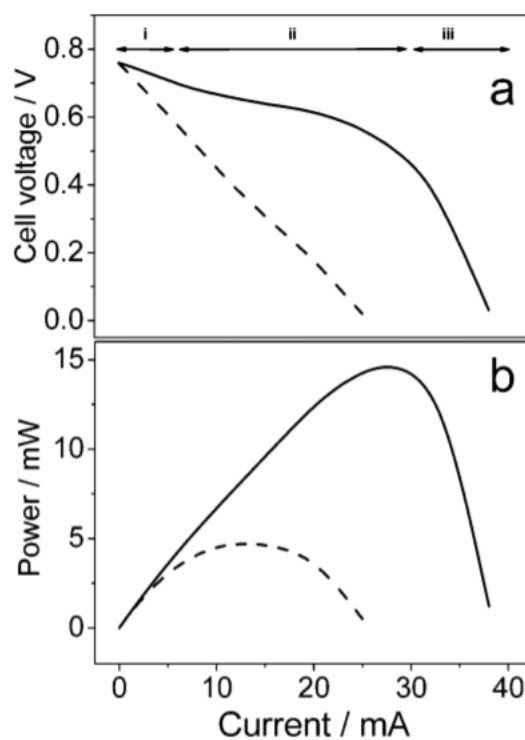
2.5.4 กำลังไฟฟ้าจากกฎของโอห์ม

กำลังไฟฟ้า หมายถึง อัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานหรือ อัตราการทำงานจากลักษณะหนึ่งไปสู่อีกลักษณะหนึ่ง หรือพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ไปในเวลา 1 วินาที เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ P และมีหน่วยเป็น วัตต์ (W) หรือจูลต่อวินาที กำลังไฟฟ้าจากกฎของโอห์ม เป็นผลคูณของแรงดันกระแสไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้างดังสมการ

$$P = VI$$

2.5.5 Polarization Curves

เส้นโค้งโพลาริเซชัน เป็นเครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์และจำแนกลักษณะของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ เส้นโค้งโพลาริเซชัน แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและความหนาแน่นทางไฟฟ้า เส้นโค้งโพลาริเซชันสามารถบันทึกค่าเพื่อแสดงความสัมพันธ์ของทั้งขั้วแอโนดและขั้วแคโทดได้โดย เครื่อง Potentiostat ถ้าไม่มีเครื่อง Potentiostat ให้ใช้ตัวต้านทานภายนอกแล้ววัดค่าของไฟฟ้าที่ได้ อาจจะมีค่าลดลงหรือเพิ่มขึ้น มีถึงจุดที่เกิด การลัดวงจรของระบบ ให้ทำการคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าจากกฎของโอห์ม เส้นโค้ง (เส้นที่บ) เป็นข้อมูลดั้งเดิม เส้นโค้ง (เส้นประ) เป็นตัวแทนของชุดข้อมูลที่มีการจัดการทางคณิตศาสตร์ ซึ่งผลของการเพิ่มลดความต้านทาน ส่งผลให้เกิดเส้นโค้งโพลาริเซชัน ที่แตกต่างกัน จากความชันของเส้นโค้งสามารถหาความต้านทานภายในได้ (Logan et al., 2006)



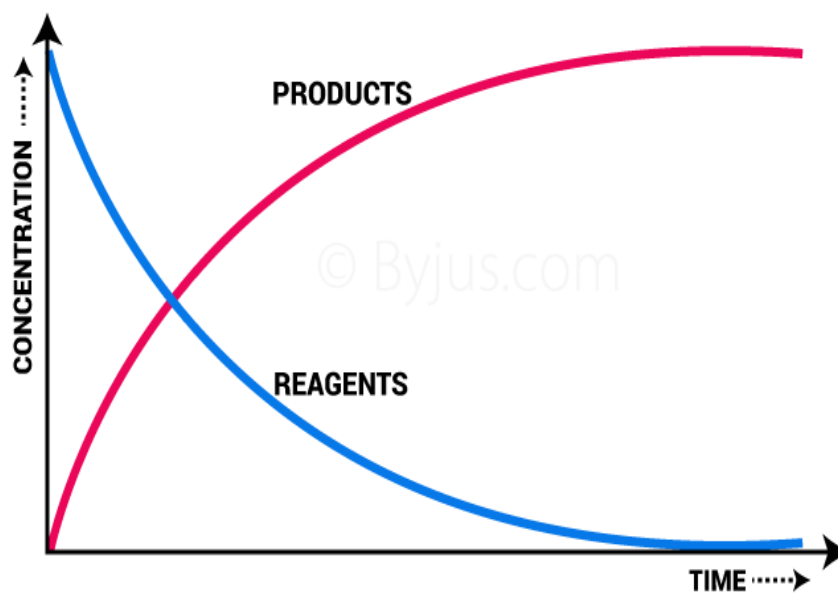
รูปที่ 7 Polarization Curve

ที่มา : (Logan et al., 2006)

2.6 อัตราการเกิดปฏิกิริยา (Reaction Rate)

- อัตราการเกิดปฏิกิริยาเป็นปริมาณที่บอกให้ทราบว่า การเปลี่ยนแปลงในปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นเร็วเพียงใด
- ระบุในเทอมของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารตั้งต้นและสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นต่อหน่วยเวลา อัตราการเกิดปฏิกิริยามีหน่วยเป็นความเข้มข้น/เวลา

RATE OF REACTION



© Byjus.com

รูปที่ 8 กราฟอัตราการเกิดปฏิกิริยา
ที่มา : (byjus.com.2562: เว็บไซต์)

2.6.1 การหาอัตราการเกิดปฏิกิริยา

อัตราการเกิดปฏิกิริยาหาได้โดยการวัดความเข้มข้นของสารตั้งต้นหรือผลิตภัณฑ์ ที่เวลาต่าง ๆ

- เขียนกราฟระหว่างเวลา (t) และความเข้มข้นของสาร [A]
- อัตราการเปลี่ยนความเข้มข้นของสาร เท่ากับ ความชันของกราฟ
- อัตราการเกิดปฏิกิริยาหาได้จากอัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสาร
- อัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสาร (ความชันของกราฟ) มีค่าไม่คงที่

2.6.2 การหาอันดับปฏิกิริยา

2.6.2.1 ปฏิกิริยาอันดับศูนย์ อัตราการเกิดปฏิกิริยามีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับความเข้มข้นของสารตั้งต้น

กฎอัตราดิฟเฟอเรนเชียล

$$\text{Rate} = -d[A]/dt = k[A]^0 = k = \text{constant}$$

กฎอัตราอินทิเกรต

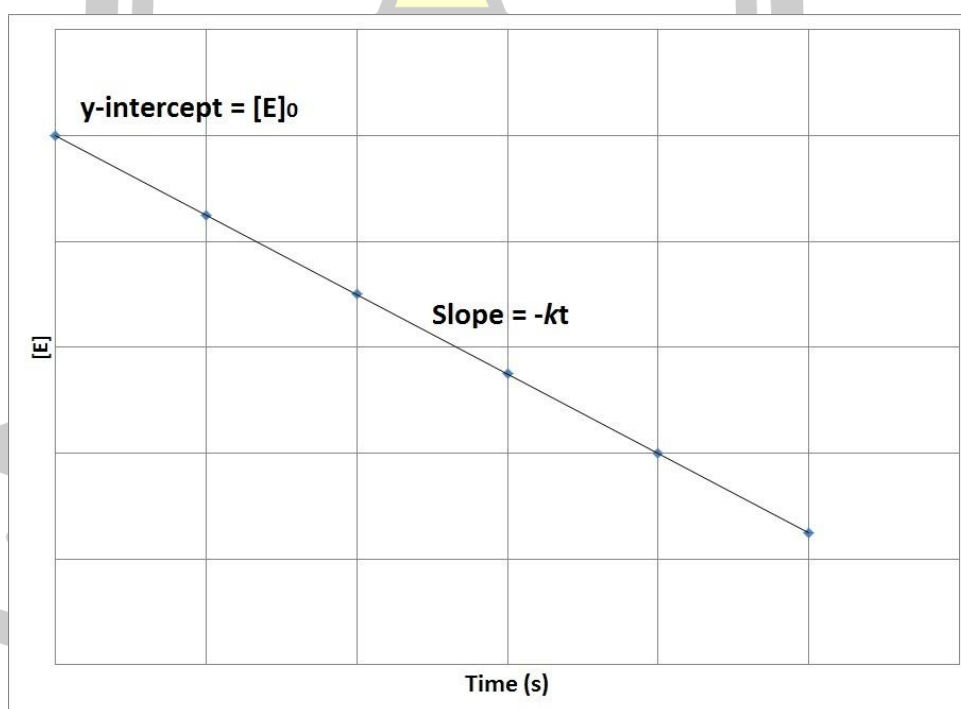
$$\text{Rate} = k[A]^n$$

$$\text{Rate} = -d[A]^0/dt = k$$

$$d[A] = -kdt$$

สมการเส้นตรงใช้พล็อตกราฟ แสดงอันดับของปฏิกิริยา

$$[A] = [A]_0 - kt$$



รูปที่ 9 กราฟอัตราของปฏิกิริยาอันดับศูนย์
(ที่มา : opentextbc.ca.2562: เว็บไซต์)

2.6.2.2 ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง อัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นกับความเข้มข้นของสาร

ตั้งต้น

กฎอัตราดิฟเฟอเรนเชียล

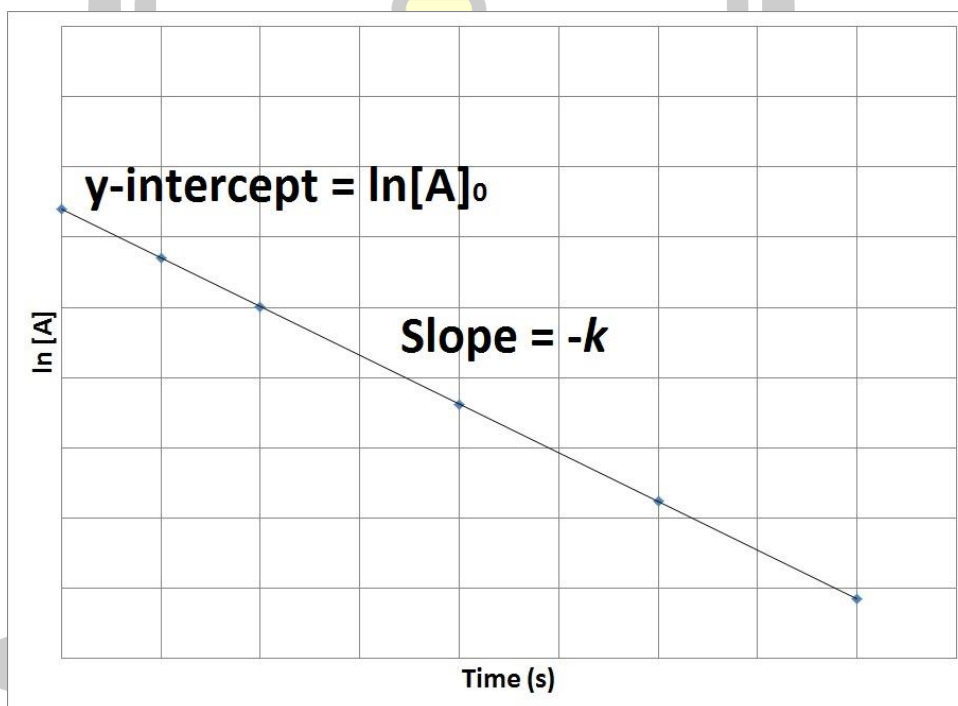
$$\text{Rate} = -\Delta[A]/\Delta t = k[A]$$

กฎอัตราอินทิเกรต

$$[A] = [A]_0 e^{-kt}$$

สมการเส้นตรงใช้พล็อตกราฟ แสดงอันดับของปฏิกิริยา

$$\ln[A] = \ln[A]_0 - kt$$



รูปที่ 10 กราฟอัตราของปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง

(ที่มา : opentextbc.ca.2562: เว็บไซต์)

2.6.2.3 ปฏิกิริยาอันดับสอง อัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นกับความเข้มข้นของสาร

ตั้งต้น

กฎอัตราดิฟเฟอเรนเชียล

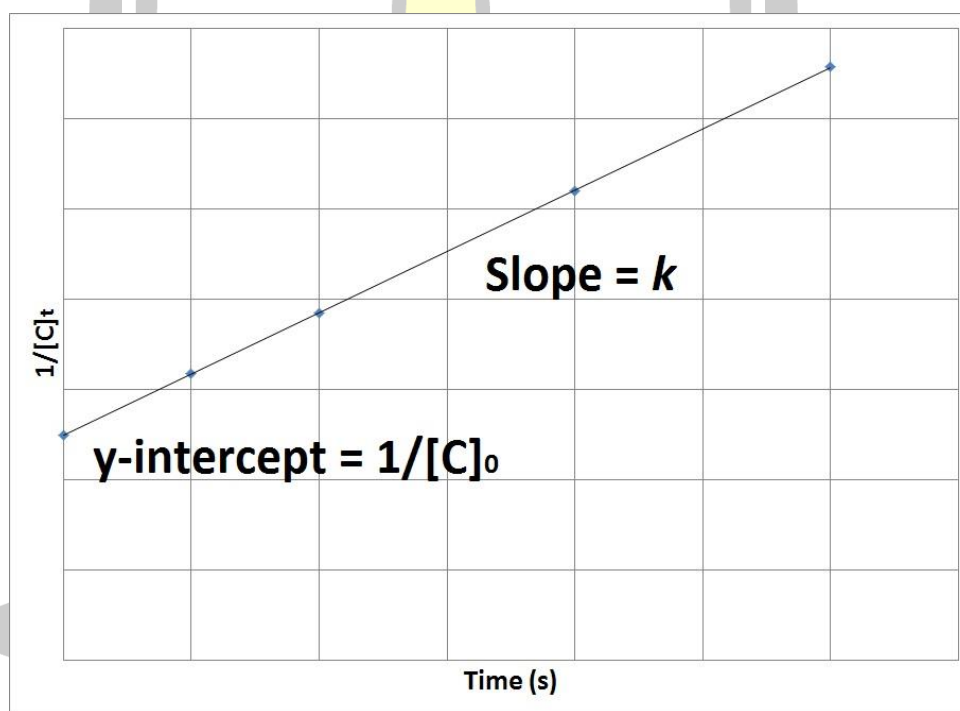
$$\text{Rate} = -\frac{\Delta[A]}{2\Delta t} = k[A]^2$$

กฎอัตราอินทิเกรต

$$1/[A] = 1/[A]_0 + kt$$

สมการเส้นตรงใช้พล็อตกราฟ แสดงอันดับของปฏิกิริยา

$$1/[A] = 1/[A]_0 + kt$$



รูปที่ 11 กราฟอัตราของปฏิกิริยาอันดับสอง

(ที่มา : opentextbc.ca.2562: เว็บไซต์)

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ศึกษาการผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้องเดี่ยว ชนิดคอลัมน์สูงในแนวตั้ง (ไม่ใช่เมมเบรนและเมดิเอเตอร์) ซึ่งได้พบว่ากำลังไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้น จนถึงระดับคงที่ที่ 0.38 มิลลิวัตต์/ตร.ม. หลังจาก 12 วัน ซึ่งมีการบันทึกข้อมูลแบบอัตโนมัติลงใน คอมพิวเตอร์โดยใช้เครื่องแปลงสัญญาณต่อเข้ากับเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้องเดี่ยวเพื่อให้สามารถ เก็บข้อมูลได้อย่างถูกต้องแม่นยำ และเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้องเดี่ยวสามารถบำบัดน้ำเสียโดยลด ค่าซีโอดีได้ร้อยละ 92 ในเวลาหนึ่งสัปดาห์ พร้อมกับได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกำลังและกระแสไฟฟ้า เช่น อัตราการไหลของอากาศ ขนาดของขั้วไฟฟ้า แคโทด ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าและอัตราการ ป้อนน้ำเสียสังเคราะห์ (กันยรัตน์ โทละสุต และคณะ, 2550)

เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้องคู่ โดยที่ Potassium ferricyanide เป็นตัวรับอิเล็กตรอน เพื่อย่อยสลายตะกอนน้ำเสียส่วนเกินและเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า พลังงานไฟฟ้าที่เสถียรใช้ระยะเวลา 250 ชั่วโมง ค่า TCOD ของกากตะกอนลดลง 46.4 เปอร์เซ็นต์ ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นอยู่ที่ 10,850 มิลลิกรัม/ลิตร ค่าพลังงานของ MFC ไม่ได้ขึ้นอยู่กับ ความเข้มข้นของสารตั้งต้น ความเข้มข้นของขั้ว แคโทดและขั้วแอโนด ค่าพีเอช อย่างไรก็ตามกำลังการผลิตของ MFC มีความสัมพันธ์ใกล้เคียงกับค่า SCOD ของกากตะกอน (Zhao et al., 2009)

เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้องเดี่ยว ห้องแคโทดสัมผัสอากาศ ถูกใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าจาก การหมักตะกอนขึ้นต้น การใช้ระยะเวลา 9 วัน ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ค่า TSS ลดลง 16.5-26.1 g / L, ค่า VSS ลดลง 15.3-24.1 g / L, pH 4.5-5.7, และ ค่าการนำไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น 2.4-4.7 mS / cm, ค่า SCOD 2.66-15.5 g / L, และ ค่า VFA 1.9-10.1 g / L, ตะกอนส่วนเกินถูกเจือจาง ด้วยน้ำที่ขุ่นขึ้นต้นก่อนที่จะใช้ใน MFC ค่าความหนาแน่นไฟฟ้าสูงสุด เท่ากับ 0.32 W / m² เมื่อเทียบกับกำลังไฟฟ้าสูงสุดของ MFC ที่มาจากน้ำที่ขุ่นขึ้นต้นเท่านั้น เท่ากับ 0.24 W / m² เมื่อเติมฟอสเฟต บัพเฟอร์ลงในสารตั้งต้น ค่าความหนาแน่นไฟฟ้าสูงสุด เท่ากับ 1.03 W / m² ประสิทธิภาพของคลอม บิก อยู่ระหว่าง 18 -57 เปอร์เซ็นต์ การค่าการกำจัด SCOD อยู่ระหว่าง 84-94 เปอร์เซ็นต์ ผลลัพธ์นี้ เหล่านี้แสดงให้เห็นว่ากากตะกอนสามารถนำไปใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่อ หมักแล้วเจือจางด้วยน้ำที่ขุ่นขึ้นต้นเท่านั้น (Yang et al., 2013a)

เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ มีแนวโน้มที่จะแปลงพลังงานชีวมวลเป็นพลังงานไฟฟ้าและได้รับความสนใจ อย่างมาก อย่างไรก็ตามวัสดุขั้วแอโนดที่มีประสิทธิภาพสูงราคาไม่แพงสำหรับ MFC มีอยู่น้อยมาก การศึกษานี้ วัสดุขั้วแอโนดมีการผสมของถ่านลอย ที่อัตราส่วน 0 %, 20 %, 40 %, 60 % และ 80 %

ซึ่งมีความหนาแน่นไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ $25.5 \text{ A} / \text{m}^2$ โดยปริมาณการผสมแก๊สไฮโดรเจนที่ 20% ซึ่งมากกว่า 37.5% การศึกษานี้แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มในการพัฒนาประสิทธิภาพของ MFC ให้สูงขึ้น (Jia et al., 2018)

ศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมในการออกแบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์สำหรับใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสียสังเคราะห์ โดยทำการเดินระบบแบบต่อเนื่อง จากผลการศึกษาพบว่าเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ชนิดไม่ได้ใช้เมดิเตอร์ประสิทธิภาพในการผลิตค่ากำลังไฟฟ้าได้สูงสุด $0.56 \text{ วัตต์} / \text{ตร.ม.}$ เมื่อทำการป้อนน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น $300 \text{ มก.} / \text{ล.}$ ต่อเนื่องด้วยอัตรา $0.53 \text{ มล.} / \text{นาที่}$ ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส (Moon et al., 2006)

เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้องคู่ เดินระบบแบบ batch โดยใช้แบคทีเรียที่ผสมไฮโดรเจนที่ $10 \text{ g} / \text{L}$ และโพแทสเซียม ที่ $10 \text{ g} / \text{L}$ ประสิทธิภาพของ MFC ถูกวิเคราะห์ภายใต้อุณหภูมิที่แตกต่างกัน คือ $40, 35, 25, 20$ และ 15 องศาเซลเซียส ซึ่งการทำงานของ MFC ที่ทำงานภายใต้อุณหภูมิ 35 และ 40 องศาเซลเซียส มีการสร้างพลังงานที่สูงกว่า MFC อุณหภูมิอื่น ๆ เมื่อระยะเวลาผ่านไปนาน มีเพียง MFC ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ที่ระบบเสถียรและให้กำลังสูงสุดในระยะเวลาสั้น (Wei et al., 2013)

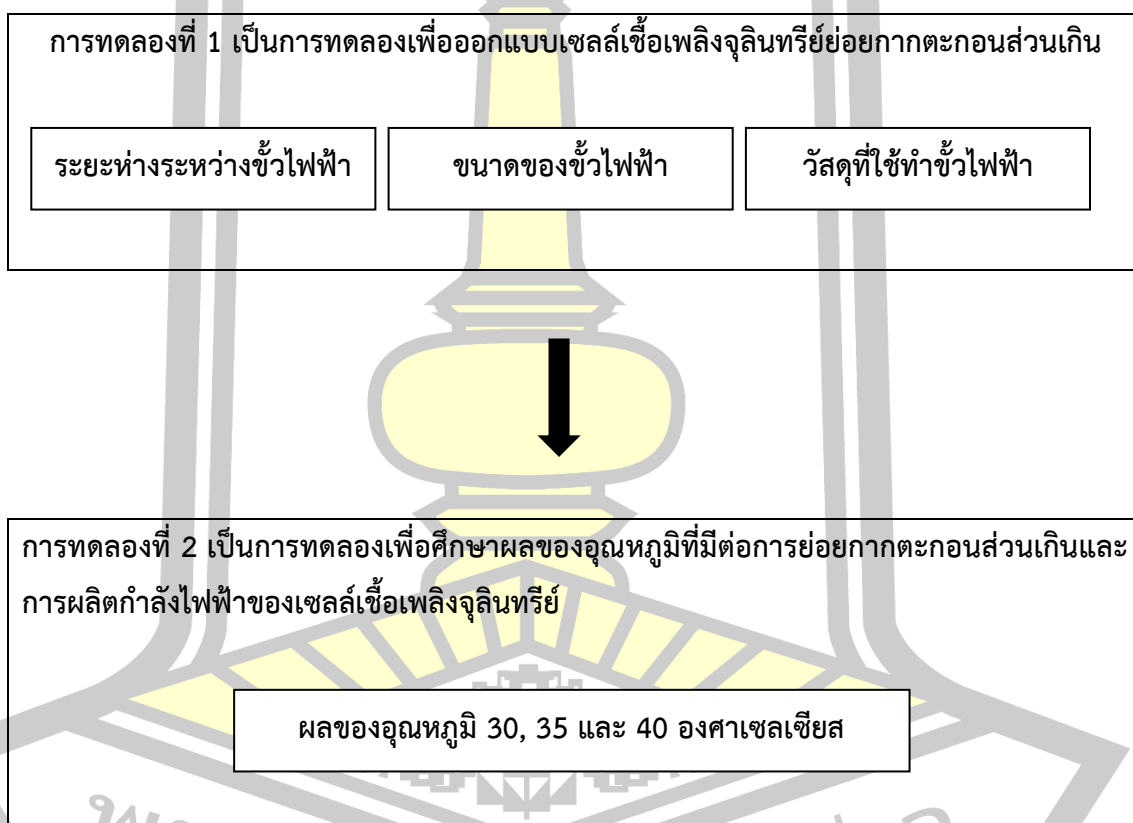
การใช้งานจริงของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ สำหรับการบำบัดน้ำเสียมักดำเนินการในช่วงกว้างของอุณหภูมิโดยเฉพาะอย่างยิ่งความแตกต่างของอุณหภูมิมักกลางวันและกลางคืน แรงดันไฟฟ้าของ MFC เปรียบเทียบระหว่าง 6 และ 18 องศาเซลเซียส อยู่ที่ 0.05 V และ 0.36 ตามลำดับ แรงดันไฟฟ้าของ MFC เปรียบเทียบระหว่าง 18 และ 30 องศาเซลเซียส อยู่ที่ 0.42 V และ 0.47 ตามลำดับ และที่ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส มีความหนาแน่นไฟฟ้าสูงสุด อยู่ที่ $2169 \text{ mW} / \text{m}^2$ (Jie Wang et al., 2014)

เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้องเดี่ยว ได้รับการทดสอบภายใต้อุณหภูมิต่างกันเพื่อสังเกตค่า พีเอช, ของแข็ง, สารอาหาร, การกำจัดสี, ความขุ่น และความหนาแน่นทางไฟฟ้า พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ในช่วง $25-35 \text{ องศาเซลเซียส}$ โดยค่าการกำจัดที่กล่าวมาข้างต้นอยู่ที่ อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ความหนาแน่นทางไฟฟ้า อยู่ที่ $74 \text{ mW} / \text{m}^2$ ประสิทธิภาพคูลอมบิก อยู่ที่ 10.65 เปอร์เซนต์ (Tee et al., 2018)

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

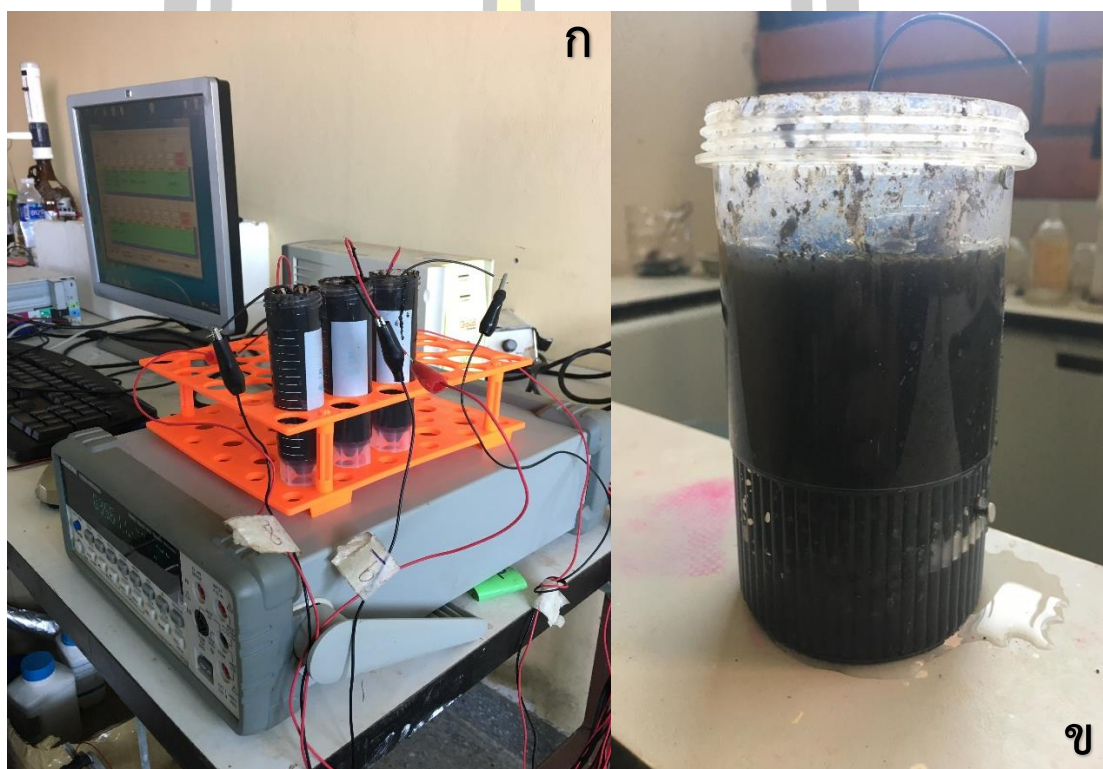
3.1 วิธีทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองเพื่อออกแบบ SMFC และศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีการย่อยกากตะกอนส่วนเกินและกำลังไฟฟ้าของ SMFC ดังกล่าว เพื่อพิจารณาแนวทางความเป็นไปได้ในการผลิตพลังงานควบคู่ไปกับการบำบัดกากตะกอนส่วนเกิน ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 12 แผนผังแสดงขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ใช้กากตะกอนส่วนเกินจากระบบบำบัดแบบแอกติเวตสลัดจ์ โรงพยาบาลมหาสารคาม โดยถังปฏิกิริยาที่ใช้ คือ หลอดทดลองพลาสติก เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 เซนติเมตร สูง 10.5 เซนติเมตร ความจุหลอด 50 มิลลิลิตร โดยที่การทดลองเป็นแบบ Batch ไม่มีการเติมสารเคมีหรือ สารอาหารสำหรับจุลินทรีย์ลงไปใน Reactor และไม่มีการกวนในระบบ ลักษณะของสลัดจ์ที่ใช้บรรจุลงในหลอดทดลองเพื่อใช้ในการทดลอง มีลักษณะเป็นแบบ Slurry มีน้ำหนักเปียก 54.71 กรัม (ความชื้น 17.35 %) ดังแสดงรายละเอียดในรูปที่ 13



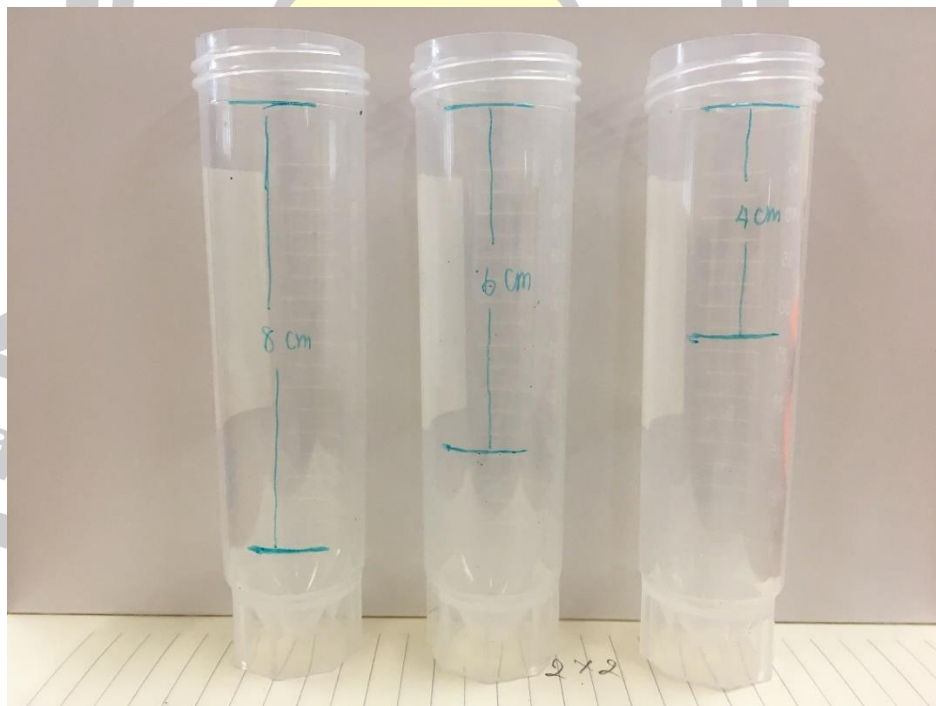
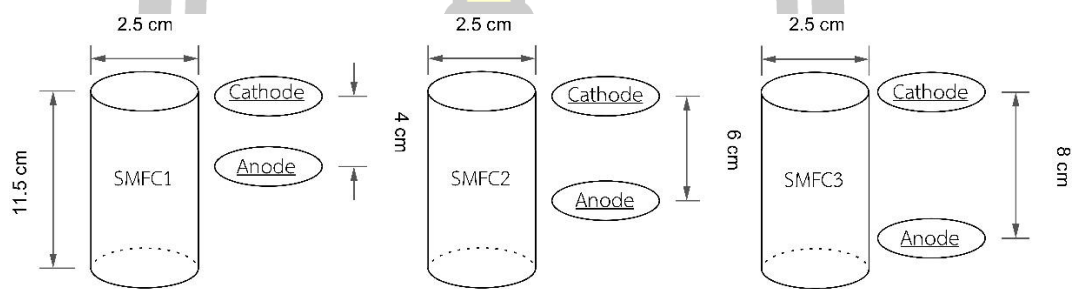
รูปที่ 13 ถังปฏิกิริยา SMFC (ก) และ ตะกอนส่วนเกิน (ข)

การทดลองในงานวิจัยนี้เป็น 2 ส่วนซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.1.1 การทดลองที่ 1 เป็นการทดลองเพื่อออกแบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ย่อยกากตะกอนส่วนเกิน (SMFC) โดยตัวแปรต้นที่สนใจ ได้แก่ ระยะห่างระหว่างขั้วแคโทดและแอโนด ขนาดของขั้วแอโนด และ วัสดุของขั้วแอโนด ส่วนตัวแปรตามที่สนใจคือค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ผลิตได้ สามารถแบ่งการทดลองย่อยในการทดลองที่ 1 ออกได้อีก 3 การทดลองดังต่อไปนี้

1) การทดลองออกแบบระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า

เป็นการทดลองวางขั้วแอโนดและแคโทดให้ห่างกัน 3 ระยะ คือ 4 ซม. (SMFC1_d) 6 ซม. (SMFC2_d) และ 8 ซม. (SMFC3_d) ดังแสดงในรูปที่ 14 เพื่อสำรวจระยะห่างที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด โดยจะทำการทดลองเพื่อหา polarization curve (ดูรายละเอียดในหัวข้อ 3.1.3) อย่างน้อย 1 ครั้ง เพื่อระบุตัวต้านทานภายนอกที่ทำให้ SMFC แต่ละถึงผลิตค่ากำลังไฟฟ้าได้สูงสุด (P_{max}) แล้วจึงนำตัวต้านทานภายนอกนั้นมาต่อเข้ากับ SMFC แต่ละถึงเพื่อเก็บข้อมูลความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นแล้วนำไปคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าและความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าผลิตได้ (ดูหัวข้อ 3.2.1) เป็นระยะเวลา 120 ชั่วโมง ผลจากการทดลองนี้ทำให้ทราบระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าที่ให้ค่า P_{max} สูงสุดในการทดลองซึ่งจะถูกเลือกมาใช้ในการทดลองต่อไป



รูปที่ 14 ภาพขณะบรรจุจากตะกอนส่วนเกินที่ใช้ในการทดลองออกแบบระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าของ SMFC1_d, SMFC2_d และ SMFC3_d

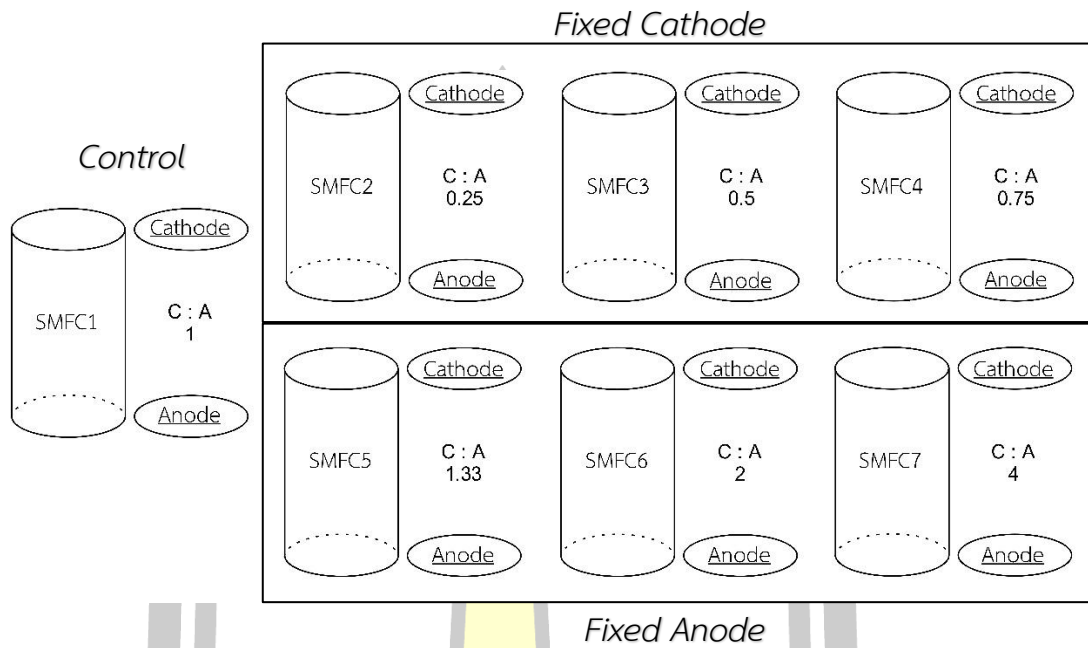
2) การทดลองออกแบบขนาดของขั้วไฟฟ้า

หลังจากได้ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงที่สุดจากการทดลองก่อนหน้านี้ ผู้วิจัยได้ทดลองออกแบบขนาดขั้วไฟฟ้าที่ใช้ใน SMFC โดยการทดลองนี้มีการเปลี่ยนขนาดของขั้วไฟฟ้า 3 รูปแบบ คือ รูปแบบที่ 1 ใช้พื้นที่ขั้วแคโทดเท่ากับพื้นที่ขั้วแอโนด (SMFC1_r) รูปแบบที่ 2 กำหนดพื้นที่ขั้วแคโทดเท่ากัน (fixed cathode area) แล้วเปลี่ยนเฉพาะขนาดพื้นที่ขั้วแอโนด (SMFC2_r, SMFC3_r และ SMFC4_r) รูปแบบที่ 3 กำหนดพื้นที่ขั้วแอโนดเท่ากัน (fixed anode area) แล้วเปลี่ยนขนาดพื้นที่ขั้วแคโทด (SMFC5_r, SMFC6_r และ SMFC7_r) ดังแสดงรายละเอียดในรูปที่ 15 และตารางที่ 6 โดยใช้ระยะห่างของขั้วไฟฟ้าตามที่เลือกไว้ในการทดลองก่อนหน้านี้ ทั้งนี้ในการทดลองนี้ได้ทำ polarization curve (ดูรายละเอียดในหัวข้อ 3.1.3) ก่อนเดินระบบเช่นกัน เพื่อระบุตัวต้านทานภายนอกที่ทำให้ SMFC แต่ละถึงผลิตค่ากำลังไฟฟ้าได้สูงสุด (P_{max}) แล้วนำตัวต้านทานภายนอกนั้นมาต่อเข้ากับ SMFC แต่ละถึงเพื่อเก็บข้อมูลความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นด้วยมัลติมิเตอร์ (GW INSTRON Model : GDM - 8255A) แล้วนำไปคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าและความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ (ดูหัวข้อ 3.2.1) เป็นระยะเวลา 240 ชั่วโมง ผลจากการทดลองนี้ทำให้ทราบขนาดของขั้วไฟฟ้าที่ให้ค่า P_{max} สูงสุด ซึ่งจะถูกลีอกมาใช้ในการทดลองต่อไป

ตารางที่ 6 อัตราส่วนของขั้วไฟฟ้าแคโทดต่อขั้วไฟฟ้าแอโนด

รายละเอียด	SMFC1 _r	SMFC2 _r	SMFC3 _r	SMFC4 _r	SMFC5 _r	SMFC6 _r	SMFC7 _r
Cathode (cm ²)	4	4	4	4	1	2	3
Anode (cm ²)	4	1	2	3	4	4	4
Ratio	1	0.25	0.5	0.75	1.33	2	4

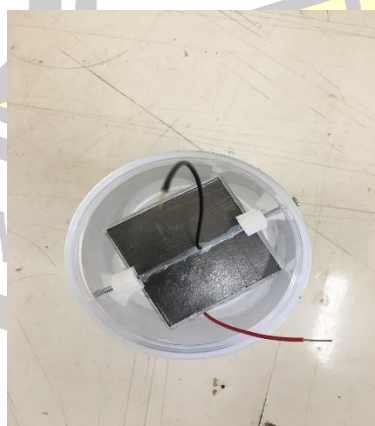
พหุ ประสิทธิภาพ



รูปที่ 15 ภาพรวมของเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองออกแบบขนาดขั้วไฟฟ้า SMFC1, SMFC2, SMFC3, SMFC4, SMFC5, SMFC6, SMFC7,

3) การทดลองออกแบบเลือกชนิดของวัสดุทำขั้วไฟฟ้า

วัสดุทำขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองคือแผ่นแกรไฟต์และผ้าคาร์บอน ดังแสดงในรูปที่ 16 ทั้งนี้ ในกรณีของแผ่นแกรไฟต์ จะนำไปอบที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ก่อนนำไปใช้งาน (Choudhury et al., 2017)



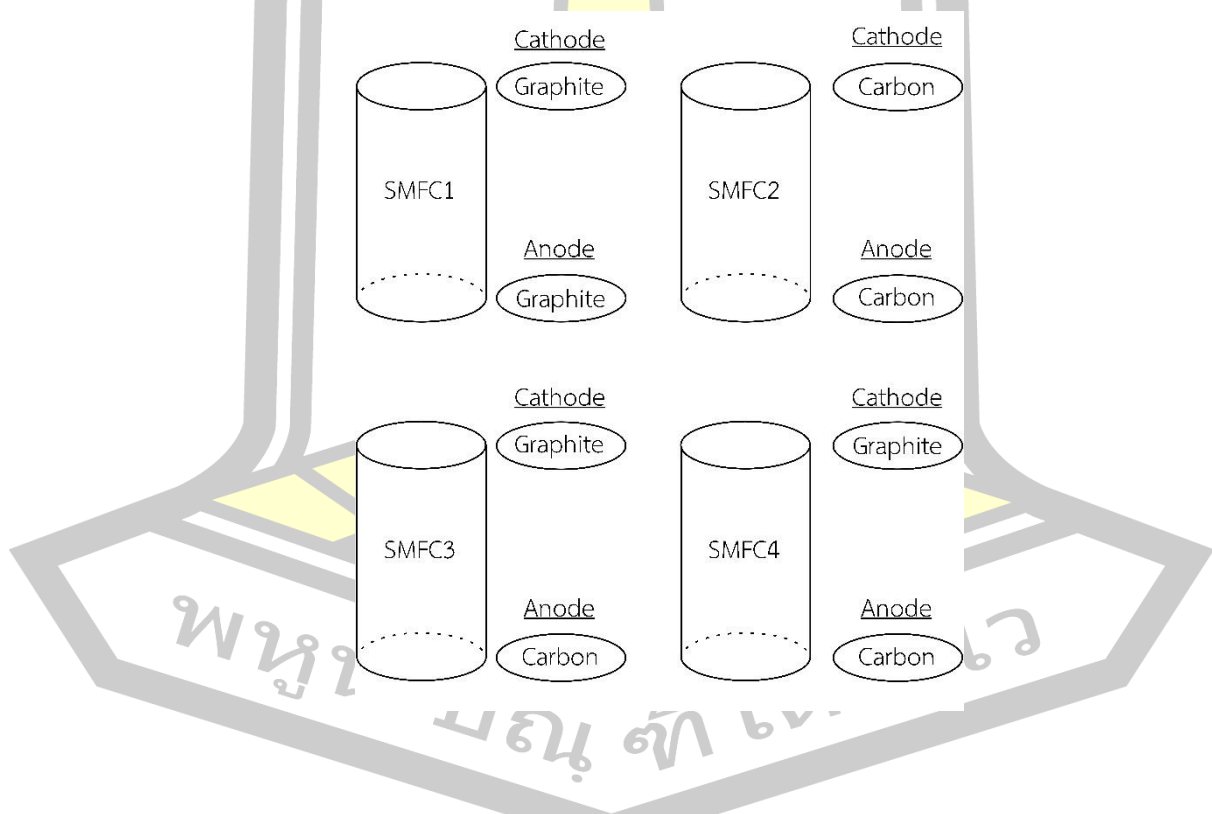
(ก) แผ่นแกรไฟต์



(ข) ผ้าคาร์บอน

รูปที่ 16 วัสดุที่ใช้เป็นขั้วอิเล็กโทรด

การทดลองนี้ นำแผ่นแกรไฟต์และผ้าคาร์บอนมาสลับกันทำเป็นขั้วไฟฟ้าซึ่งมี 4 รูปแบบ คือ 1) ใช้แผ่นแกรไฟต์เป็นทั้งขั้วแคโทดและแอโนด (SMFC1_m) 2) ใช้ผ้าคาร์บอนเป็นทั้งขั้วแคโทดและแอโนด (SMFC2_m) 3) ใช้แผ่นแกรไฟต์เป็นขั้วแคโทดและผ้าคาร์บอนเป็นขั้วแอโนด (SMFC3_m) 4) ใช้ผ้าคาร์บอนเป็นขั้วแคโทดและแผ่นแกรไฟต์เป็นขั้วแอโนด (SMFC4_m) ดังแสดงในรูปที่ 17 โดยใช้ระยะห่างขั้วไฟฟ้าและขนาดขั้วไฟฟ้าที่ให้ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงสุดอ้างอิงจากการทดลอง 2 การทดลองก่อนหน้านี ในการทดลองนี้ได้หา polarization curve (ดูรายละเอียดในหัวข้อ 3.1.3) อย่างน้อย 1 ครั้ง เพื่อระบุค่าความต้านทานภายนอกที่ทำให้ SMFC แต่ละเซลล์ผลิตค่ากำลังไฟฟ้าได้สูงสุด (P_{max}) เช่นเดียวกับการทดลอง 2 การทดลองก่อนหน้านี แล้วนำตัวต้านทานภายนอกนั้นมาต่อเข้ากับ SMFC แต่ละถังเพื่อเก็บข้อมูลความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นด้วยมัลติมิเตอร์ (GW INSTRUK Model : GDM - 8255A) แล้วนำไปคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าและความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ (ดูหัวข้อ 3.2.1) เป็นระยะเวลา 240 ชั่วโมง ผลจากการทดลองนี้ทำให้ทราบ รูปแบบการใช้วัสดุทำขั้วที่ให้ค่า P_{max} สูงสุดซึ่งจะถูกเลือกมาใช้ในการทดลองต่อไป



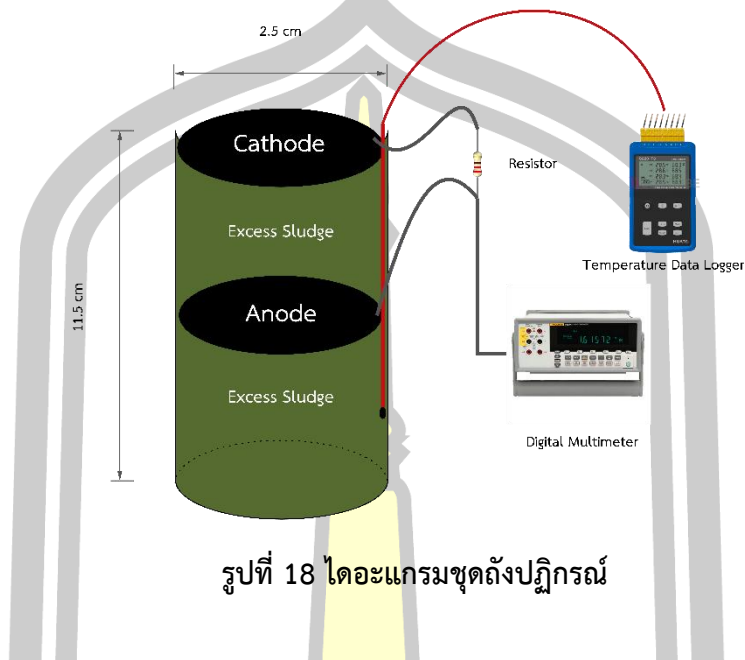
รูปที่ 17 การทดลองออกแบบวัสดุทำขั้วไฟฟ้าที่ใช้ใน SMFC SMFC1_m- SMFC4_m

3.1.2 การทดลองที่ 2

เป็นการทดลองเพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อการย่อยกากตะกอนส่วนเกินและการผลิตกำลังไฟฟ้าของ SMFC โดยผู้วิจัยได้นำเอาผลที่ได้จากการทดลองที่ 1 มาสร้าง SMFC แล้วนำมาใช้ในการย่อยกากตะกอนส่วนเกินที่อุณหภูมิ 30, 35 และ 40 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลาประมาณ 18 วัน ทั้งนี้สาเหตุที่เลือกอุณหภูมิในช่วงดังกล่าว เพราะต้องการทดสอบความสามารถของจุลินทรีย์ชนิด Mesophilic ที่เจริญเติบโตได้ดีในช่วงอุณหภูมิประมาณ 20 - 45 องศาเซลเซียส (พลกฤษณ์ คุ่มกล้า, 2557) ซึ่งเป็นอุณหภูมิของอากาศในพื้นที่ส่วนใหญ่ของประเทศไทย (อังคณา, สรวิศ, และอนุเภา, 2563) ทั้งนี้เป็นที่กล่าวกันว่าช่วงที่เหมาะสมที่สุดในการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ชนิด Mesophilic คือ 37 - 41 องศาเซลเซียส (พลกฤษณ์ คุ่มกล้า, 2557) โดยแบคทีเรียเมโซฟิลิกนั้นมีจำนวนสปอร์สูงกว่าเทอร์โมฟิลิกและสามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมได้ดีกว่าเทอร์โมฟิลิกอีกด้วย จึงทำให้ระบบที่ใช้เมโซฟิลิกมีความเสถียรกว่า (พลกฤษณ์ คุ่มกล้า, 2557)

ผู้วิจัยได้ประดิษฐ์ SMFC ที่เหมือนกันจำนวน 18 เซลล์ตามแบบที่ได้จากการทดลองที่ 1 โดยแบ่งใช้ SMFC 6 เซลล์ต่อ 1 ระดับอุณหภูมิ ในการทดลองแต่ละระดับอุณหภูมิ ผู้วิจัยได้ติดตั้งใช้เทอร์โมคัปเปอร์วัดอุณหภูมิ Huato Thermocouple Model : Type K (-60 °C to 350 °C) ลงไปในถัง SMFC โดยให้ตัวเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิสัมผัสกากตะกอนส่วนเกินที่บรรจุอยู่ถึงโดยตรงดังแสดงในรูปที่ 18 จากนั้นก็นำ SMFC ทั้ง 6 เซลล์ไปลงในอ่างน้ำที่ติดตั้งเครื่องควบคุมอุณหภูมิ (AUGIENB Sous Vide Machine Model : SVJ - 1000) ดังแสดงในรูปที่ 19 ไว้ เมื่อตั้งอุณหภูมิในระดับที่ต้องการ เช่น 30 องศาเซลเซียสแล้ว ผู้วิจัยได้ทำการทดลองหา polarization curve (ดูรายละเอียดในหัวข้อ 3.1.3) ก่อนเพื่อระบุค่าความต้านทานภายนอกที่ทำให้ SMFC แต่ละถังผลิตค่ากำลังไฟฟ้าได้สูงสุด (P_{max}) จากนั้นจึงนำตัวต้านทานภายนอกนั้นมาต่อเข้ากับ SMFC แต่ละถังแล้วเก็บข้อมูลความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นด้วยมัลติมิเตอร์ (GW INSTRON Model : GDM - 8255A) แล้วนำไปคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าและความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า (ดูหัวข้อ 3.2.1) ที่ SMFC แต่ละถังผลิตได้ตลอดระยะเวลาทดลองย่อยกากตะกอนส่วนเกิน 18 วัน ทั้งนี้วันที่เริ่มต่อตัวต้านทานภายนอก (วันที่ 0) และวันที่ 3, 6, 9, 12, 15, และ 18 วัน จะมีการเก็บของผสมทั้งหมดที่อยู่ใน SMFC ไปตรวจวัดค่าของแข็งทั้งหมด (TS) ของแข็งระเหยง่าย (VS) และ ค่าความต้องการออกซิเจนทางเคมี (COD) เพื่อสำรวจความสามารถในการกำจัดกากตะกอนส่วนเกินของ SMFC ณ อุณหภูมินั้น (ตั้งนั้นจำนวน SMFC ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิทดลองจะลดน้อยลงทุก 3 วันจนมาถึงวันที่ 15 จะเหลือเพียง 1 หลอดไว้สำหรับตรวจวัดในวันที่ 18 ซึ่งเป็นวันสุดท้ายของการทดลอง) ทั้งนี้อุณหภูมิของกากตะกอนส่วนเกินที่วัดได้ตลอดการทดลองจะถูกเก็บไว้ใน temperature data logger (Huato Model : S220-T8) เพื่อนำมาประกอบการวิเคราะห์ผลต่อไป ผลที่ได้จากการทดลองนี้ จะถูกนำมาวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิที่มีต่อความสามารถในการบำบัดกากตะกอนส่วนเกินและความสามารถในการ

การผลิตไฟฟ้าโดยรูปแบบของสมการที่ใช้แสดงความสัมพันธ์นั้นจะระบุหลังได้ผลการทดลองแล้ว ทั้งนี้ พารามิเตอร์ที่ตรวจวัดในการทดลองและวิธีที่ใช้ในการตรวจวัด เป็นดังแสดงในตารางที่ 7



รูปที่ 18 ไดอะแกรมชุดถังปฏิกรณ์



รูปที่ 19 เครื่องควบคุมอุณหภูมิ และ Temperature data logger

ตารางที่ 7 พารามิเตอร์ในการตรวจวัด

พารามิเตอร์	วิธีตรวจวัด	ความถี่
ความต้องการออกซิเจนทางเคมี (COD)	Solid Dilutions Closed Reflux (Nogueroles-Arias et al., 2012) ดูรายละเอียดวิธีวิเคราะห์ในภาคผนวก	ทุก 3 วัน
อุณหภูมิ	บันทึกข้อมูล โดยใช้เทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิ (Huato Thermocouple Type K (-60 °C to 350 °C) และใช้เครื่อง Temperature data loggers (Huato Model : S220-T8) บันทึกข้อมูล	ทุกวัน
ของแข็งทั้งหมด (TS)	Gravimetric Analysis (APHA, 1999)	ทุก 3 วัน
ของแข็งระเหยง่าย (VS)	Gravimetric Analysis (APHA, 1999)	ทุก 3 วัน
ความต่างศักย์ (V)	บันทึกข้อมูล โดยใช้เครื่อง Digital multi-meter (GW INSTEK Model : GDM - 8255A)	ทุกวัน
ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า (PD)	คำนวณ (ดูรายละเอียดในหัวข้อ 3.1.3)	ทุกวัน
พลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่ SMFC ผลิตได้ตลอดระยะเวลาเดินระบบ (EE)	คำนวณ (ดูรายละเอียดในหัวข้อ 3.1.3)	วันสุดท้ายของการเดินระบบ

3.1.3 Polarization Curve

ในงานวิจัยนี้ใช้การทดลองนี้เพื่อหาความต้านทานภายนอกที่เหมาะสมสำหรับ SMFC กล่าวคือเมื่อนำตัวต้านทานภายนอกตัวนั้นมาเชื่อมต่อระหว่างขั้วแคโทดเข้ากับขั้วแอโนดแล้วทำให้ SMFC ผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด ทั้งนี้ ณ จุดที่เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุดนั้น ความต้านทานภายในของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ถือว่ามีค่าเท่ากับค่าความต้านทานภายนอกที่นำมาต่อในขณะนั้นเลย (JM et al., 2017) วิธีทำการทดลองเป็นดังต่อไปนี้

1) นำตัวต้านทานภายนอกจำนวน 10 ค่า ได้แก่ 20000, 17500, 12200, 10000, 7500, 4700, 2200, 1000, 560, 20 โอห์ม มาเชื่อมต่อระหว่างขั้วแคโทดเข้ากับขั้วแอโนด โดยเชื่อมต่อเป็นระยะเวลา 5 นาทีต่อความต้านทานภายนอก 1 ค่า เหตุผลที่ใช้ระยะเวลา 5 นาที

เป็นเพราะ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ามีความเสถียรภายในระยะเวลา 5 นาที (Papaharalabos et al., 2015)(P. Zhang et al., 2015)

2) ระหว่างต่อตัวต้านทานภายนอกแต่ละค่า มีการบันทึกค่าความต่างศักย์ โดยใช้เครื่องมือวัดมัลติมิเตอร์ (GW INSTRUMENT Model : GDM - 8255A)

3) พล็อตกราฟ Polarization Curve นำค่าตัวต้านทานที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดซึ่งเป็นค่าเดียวกันกับค่าความต้านทานภายในของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ขณะเกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุดมาใช้ในการทดลองต่อไปตามความเหมาะสม

3.2 วิธีวิเคราะห์ผลการทดลอง

3.2.1 การคำนวณความสามารถในการผลิตไฟฟ้า

ค่าทางไฟฟ้าที่ใช้แสดงความสามารถในการผลิตกระแสไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ได้แก่ กำลังไฟฟ้า (P : Power) คำนวณจากสมการที่ 1 ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า (PD : Power Density) คำนวณจากสมการที่ 2 พลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่ SMFC ผลิตได้ตลอดระยะเวลาเดินระบบ (EE : Electrical Energy) คำนวณจากสมการที่ 2

$$P = V \cdot I \quad (1)$$

เมื่อ	P	คือ กำลังไฟฟ้า หน่วยเป็นวัตต์ (W)
	V	คือ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า หน่วยเป็นโวลต์ (V)
	I	คือ ค่ากระแสไฟฟ้า หน่วยเป็นแอมแปร์ (A)

$$PD = P/Vol \quad (2)$$

เมื่อ	Pd	คือ ค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า หน่วยเป็นวัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร (W/m ³)
	Vol.	คือ ปริมาตรของ SMFC หน่วยเป็นลูกบาศก์เมตร (m ³)

$$EE = \int_{t_0}^{t_n} P dt = \sum_i P_i \cdot t_i \quad (3)$$

เมื่อ EE คือ พลังงานไฟฟ้าที่ SMFC ผลิตได้ตั้งแต่เวลา t_0 ถึงเวลา t_n หน่วยเป็นวัตต์ ชั่วโมง (Whr)

t คือ เวลา หน่วยเป็นชั่วโมง (hr)

i คือ จำนวนข้อมูลรายชั่วโมงที่เก็บได้

3.2.2 การคำนวณความสามารถในการกำจัดกากตะกอน

3.2.2.1 ประสิทธิภาพการกำจัดกากตะกอน

งานวิจัยนี้ได้เก็บตัวอย่างของผสมรูป slurry .ในถัง SMFC มาวิเคราะห์ค่า COD, TS และ VS ตามวิธีที่แสดงในตารางที่ 7 เพื่อใช้เป็นตัวแทนแสดงปริมาณกากตะกอนที่อยู่ในระบบ และผู้วิจัยได้เลือกใช้ค่า COD เป็นตัวแทนในการคำนวณหาประสิทธิภาพการกำจัดกากตะกอน (RE : COD Removal Efficiency) ดังสมการที่ 4

$$RE = (COD_{before} - COD_{after}) \cdot 100 / COD_{before} \quad (4)$$

เมื่อ RE คือ ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี (%)

COD_{before} คือ ค่าซีโอดีก่อนการบำบัด (mgCOD/gTS)

COD_{after} คือ ค่าซีโอดีหลังการบำบัด (mgCOD/gTS)

3.2.2.2 อัตราเร็วในการกำจัดกากตะกอน

ผู้วิจัยได้เลือกใช้ค่า COD เป็นตัวแทนในการคำนวณหาอัตราเร็วในการกำจัดกากตะกอน (RR : COD Removal Rate) ดังสมการที่ 5

$$RR = (COD_{before} - COD_{after}) / RT \quad (5)$$

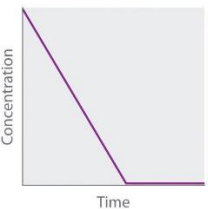
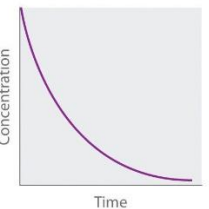
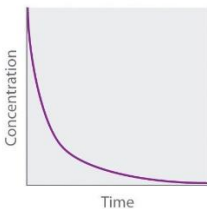
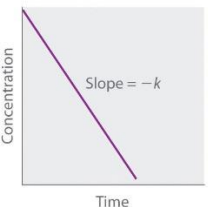
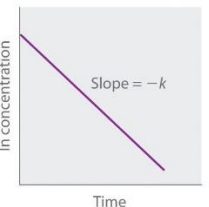
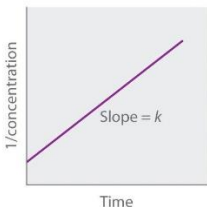
เมื่อ RR คือ อัตราเร็วในการกำจัดกากตะกอนส่วนเกิน (mgCOD/gTS-hr)

RT คือ ระยะเวลาตั้งแต่เริ่มระบบจนถึงระยะเวลาที่ต้องการวิเคราะห์ (hr)

3.2.3 การหาค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา ณ อุณหภูมิต่างกัน

ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาหาได้โดยการวัดความเข้มข้นของสารตั้งต้น ที่เวลาต่าง ๆ โดยเขียนกราฟระหว่างเวลา (t) และความเข้มข้นของสาร [A] โดยการจัดรูปแบบของกราฟให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรง ดังแสดงในรูปที่ 19 ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา หาจากการลากเส้นแนวโน้มของกราฟที่กล่าวมาข้างต้น แล้วหาค่า k ในสมการ

นำค่า k ที่หาได้ ณ อุณหภูมิต่าง ๆ กันมาเปรียบเทียบเพื่อวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการย่อยกากตะกอนส่วนเกินและการผลิตไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ ดังแสดงรายละเอียดในรูปที่ 20

	Zeroth Order	First Order	Second Order																								
Differential rate law	Rate = $-\frac{\Delta[A]}{\Delta t} = k$	Rate = $-\frac{\Delta[A]}{\Delta t} = k[A]$	Rate = $-\frac{\Delta[A]}{\Delta t} = k[A]^2$																								
Concentration vs. time																											
Integrated rate law	$[A] = [A]_0 - kt$	$[A] = [A]_0 e^{-kt}$ or $\ln[A] = \ln[A]_0 - kt$	$\frac{1}{[A]} = \frac{1}{[A]_0} + kt$																								
Straight-line plot to determine rate constant																											
Relative rate vs. concentration	<table border="1"> <thead> <tr> <th>[A], M</th> <th>Rate, M/s</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table>	[A], M	Rate, M/s	1	1	2	1	3	1	<table border="1"> <thead> <tr> <th>[A], M</th> <th>Rate, M/s</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>3</td> </tr> </tbody> </table>	[A], M	Rate, M/s	1	1	2	2	3	3	<table border="1"> <thead> <tr> <th>[A], M</th> <th>Rate, M/s</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>9</td> </tr> </tbody> </table>	[A], M	Rate, M/s	1	1	2	4	3	9
[A], M	Rate, M/s																										
1	1																										
2	1																										
3	1																										
[A], M	Rate, M/s																										
1	1																										
2	2																										
3	3																										
[A], M	Rate, M/s																										
1	1																										
2	4																										
3	9																										
Half-life	$t_{1/2} = \frac{[A]_0}{2k}$	$t_{1/2} = \frac{0.693}{k}$	$t_{1/2} = \frac{1}{k[A]_0}$																								
Units of k, rate constant	M/s	1/s	M ⁻¹ ·s ⁻¹																								

รูปที่ 20 สมการการคำนวณอัตราของอันดับการเกิดปฏิกิริยา

(ที่มา : chem.libretexts.org/@go/page/24269)

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

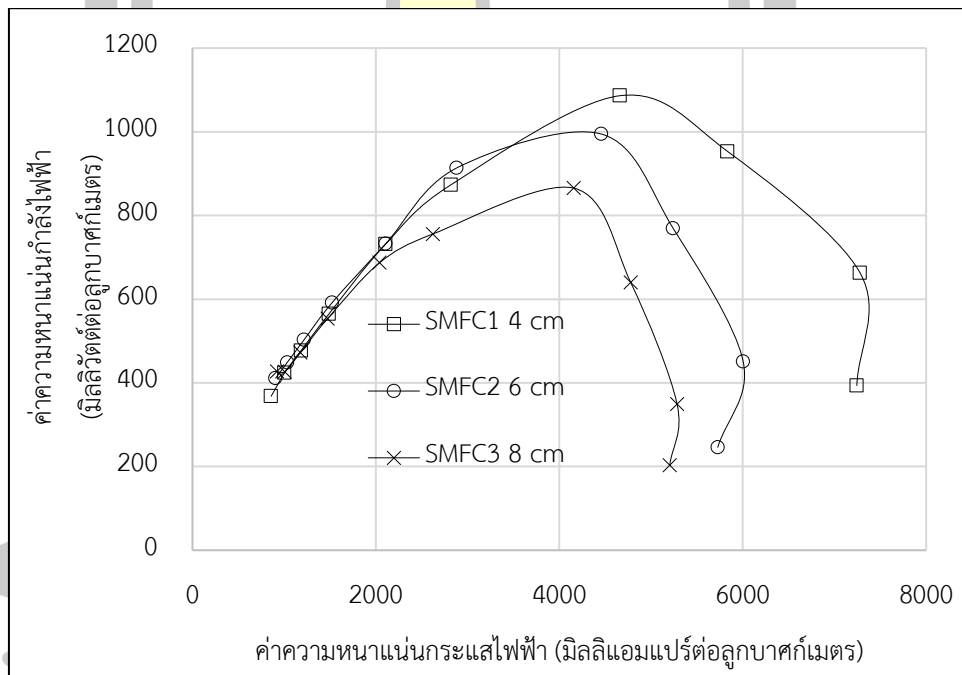
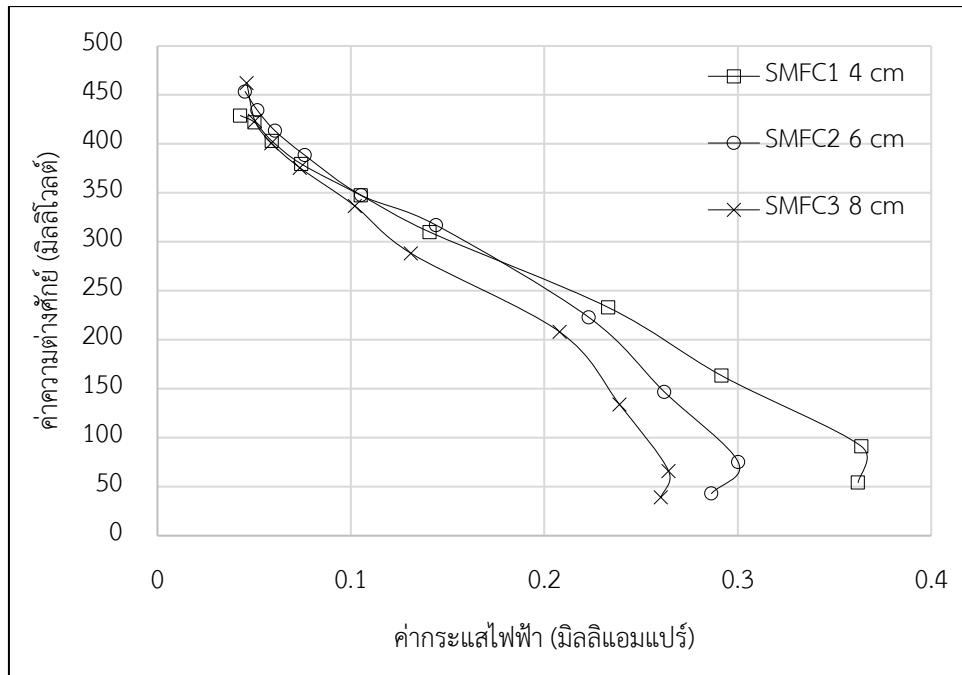
4.1 ผลการทดลองเพื่อออกแบบ SMFC

การทดลองในช่วงนี้เป็นการหาสภาวะที่เหมาะสมในการทำงานของ SMFC ในการผลิตไฟฟ้า และการย่อยสลายกากตะกอนส่วนเกิน ด้วยการเดินระบบแบบต่อเนื่องและไม่มีการเติมสารเคมีลงในระบบ โดยแบ่งเป็นการทดลองย่อย 3 การทดลอง มีรายละเอียดของผลการทดลองดังนี้

4.1.1 ผลของระยะห่างของขั้วไฟฟ้าที่มีต่อ SMFC

ผลการทดลองโพลาริเซชันเป็นดังแสดงในรูปที่ 21 พบว่าค่าความต้านทานภายนอกที่ทำให้ SMFC ผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุดคือ 1000 โอห์มทั้งกรณี SMFC₁ (ระยะห่างระหว่างขั้ว 4 ซม.) SMFC₂ (ระยะห่างระหว่างขั้ว 6 ซม.) และ SMFC₃ (ระยะห่างระหว่างขั้ว 8 ซม.) โดยพบว่าค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ SMFC ผลิตได้ในการทดลองโพลาริเซชันเรียงจากมากไปหาน้อยคือ 1,086.2 มิลลิวัตต์ต่อลูกบาศก์เมตรสำหรับ SMFC₁ 994.5 มิลลิวัตต์ต่อลูกบาศก์เมตรสำหรับ SMFC₂ และ 865.2 มิลลิวัตต์ต่อลูกบาศก์เมตรสำหรับ สำหรับ SMFC₃ จากรูปที่ 21 เป็นที่น่าสังเกตว่าในช่วงที่กระแสไฟฟ้ามีย่าน้อยกว่า 0.0001 mA ไม่พบความแตกต่างของความต่างศักย์และความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าที่ SMFC ทั้ง 3 ผลิตได้ แต่เมื่อกระแสไฟฟ้าเริ่มมีค่ามากกว่า 0.0001 mA ความชันของเส้นกราฟความต่างศักย์ซึ่งแสดงถึงความต้านทานภายในของ SMFC₃ (ระยะห่างระหว่างขั้ว 8 ซม.) เพิ่มสูงกว่า SMFC อีก 2 ดังอย่างเห็นได้ชัด และเมื่อกระแสไฟฟ้าเริ่มมีค่ามากกว่า 0.00018 mA ความชันของเส้นกราฟความต่างศักย์ซึ่งแสดงถึงความต้านทานภายในของ SMFC₂ (ระยะห่างระหว่างขั้ว 6 ซม.) ก็เพิ่มสูงกว่า SMFC₁ อย่างชัดเจน กล่าวได้ว่าที่กระแสไฟฟ้ามากกว่า 0.00018 mA เป็นต้นไปความต้านทานภายในของ SMFC มีค่าต่ำเมื่อขั้วไฟฟ้าอยู่ใกล้กัน ซึ่งส่งผลให้ค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าของ SMFC₁ ในช่วงนั้นสูงกว่ากรณีของ SMFC₂ และ SMFC₃ จนกล่าวได้ว่าค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงสุดของ SMFC มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะห่างระหว่างขั้วลดลง

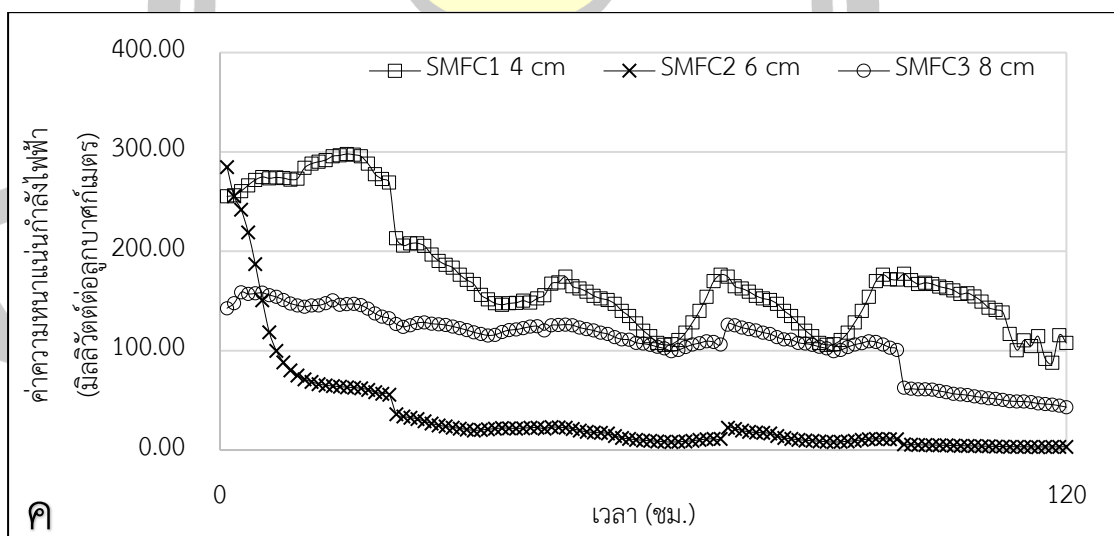
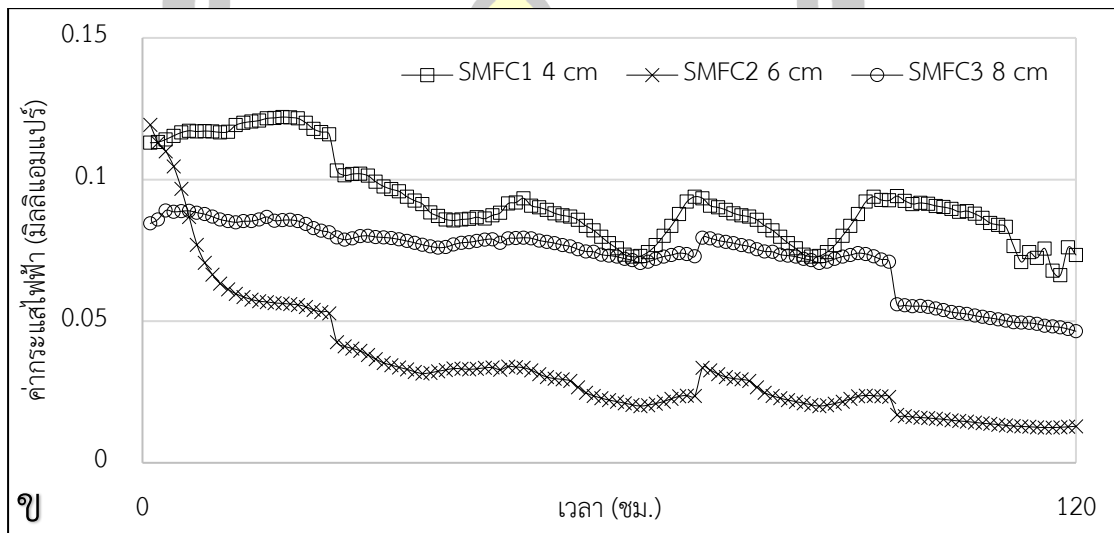
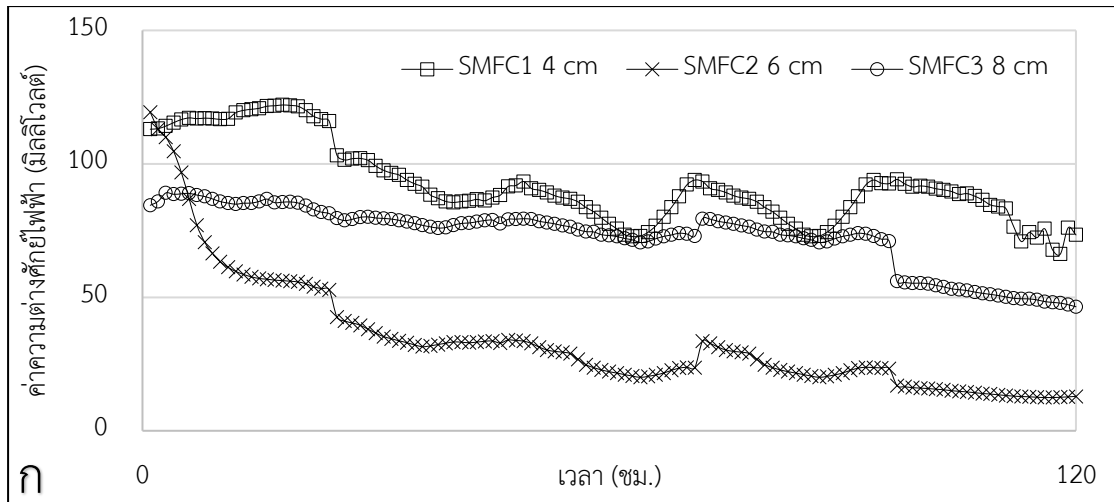
พหุ ประถมศึกษา



รูปที่ 21 ผลการทดลองโพลาริเซชันที่มีความต้านทานภายนอก 150 - 10000 โอห์ม

เมื่อนำตัวต้านทานภายนอก 1000 โอห์ม (พิจารณาจากผลการทดลองโพลาริเซชัน) มาเชื่อมขั้วแอโนดเข้ากับขั้วแคโทดของ SMFC แต่ละถัง แล้วเดินระบบอย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิห้อง พบว่าได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 22 SMFC ทั้ง 3 ถังมีแนวโน้มคล้ายกัน คือ ค่าความต่างศักย์ลดลงเมื่อระยะเวลาผ่านไป โดยเมื่อระยะเวลาผ่านไป 120 ชั่วโมง พบว่าที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 4, 6 และ 8 เซนติเมตร ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 174.72 ± 58.42 , 32.66 ± 50.42 และ 109.03 ± 31.85 มิลลิวัตต์ต่อลูกบาศก์เมตรตามลำดับดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 8 เมื่อทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าทั้ง 3 ค่าด้วยวิธีทางสถิติ one-way-ANOVA ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% พบว่า ข้อมูลทั้ง 3 ชุดมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญระดับความเชื่อมั่น 95 % ($P < 0.05$) แต่ยังไม่ได้ว่าคู่ใดบ้างที่แตกต่างกัน จึงนำข้อมูลที่ละชุดมาทดสอบต่อด้วยวิธีทางสถิติ t-test แบบ 1-tailed พบว่ากรณีระยะห่างระหว่างขั้ว 4 เซนติเมตร SMFC ผลิตไฟฟ้าได้ดีกว่ากรณีระยะห่างระหว่างขั้ว 6 ($P < 0.05$) และ 8 เซนติเมตร ($P < 0.05$) อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% จึงกล่าวได้ว่า SMFC ผลิตความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าได้สูงที่สุดที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 4 ซม. ซึ่งเป็นระยะห่างสั้นที่สุดในการทดลองนี้ ยิ่งระยะห่างระหว่างขั้วน้อยเท่าไร การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทดจะเกิดเร็วขึ้นขึ้น ทำให้ค่าความต่างศักย์เพิ่มมากขึ้นอีกด้วย (Liu et al., 2008)

ในส่วนของการกำจัดกากตะกอนส่วนเกินนั้นพบว่า SMFC แต่ละถังสามารถกำจัดกากตะกอนส่วนเกินได้ โดย SMFC ที่มีระยะห่างระหว่างขั้ว 4 ซม. นั้นสามารถกำจัด VS ได้ 39.6 % ซึ่งสูงกว่า SMFC ที่มีระยะห่างระหว่างขั้ว 6 ซม. (31.2 %) และ 8 ซม. (32.3 %) ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 9 เมื่อนำปริมาณ VS ถูกกำจัดทั้งหมด (กรัม VS) กับ ค่าพลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่ SMFC แต่ละถังผลิตได้ (มิลลิวัตต์·ชั่วโมง) มาพล็อตลงในกราฟ พบว่าแปรผันตามกันในรูปแบบสมการเชิงเส้น ($EE = 0.7774x \text{ removed VS} - 8.6459$, $R^2 = 0.9626$) ดังแสดงในรูปที่ 23 อธิบายได้ว่าเมื่อกากตะกอนส่วนเกินถูกจุลินทรีย์ย่อยสลายได้มาก ปริมาณ VS ถูกกำจัดทั้งหมดก็ย่อมมากไปด้วย ส่งผลให้จำนวนประจุที่เกิดขึ้นใน SMFC มีมาก ทำให้ SMFC สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้มากตามไปด้วย แม้สิ่งนี้ไม่ใช่ผลการทดลองหลัก แต่ก็ถือเป็นเกร็ดความรู้ที่สังเกตเห็นจากผลการทดลอง

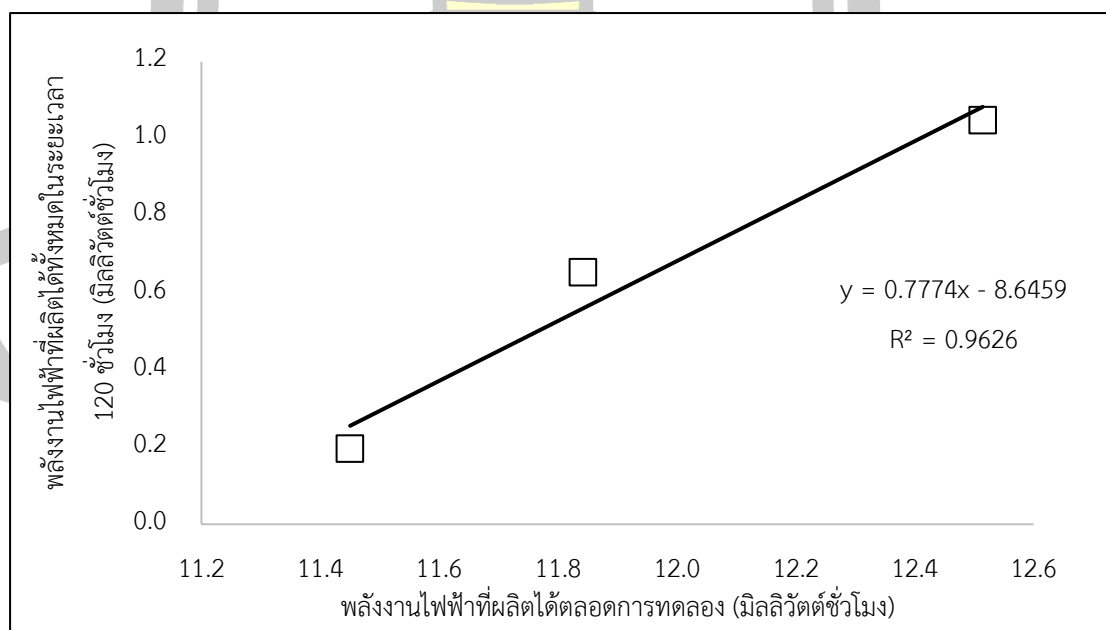


รูปที่ 22 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (ก) ค่ากระแสไฟฟ้า (ข) และค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า (ค) ที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าที่แตกต่างกัน 3 ระยะ

ตารางที่ 8 เปรียบเทียบค่าทางไฟฟ้าของการศึกษาระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า

ค่าทางไฟฟ้า	ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า (ซม.)		
	4	6	8
ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุด (มิลลิโวลต์)	122.06	119.35	89.10
ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุด (มิลลิแอมแปร์)	0.122	0.119	0.089
ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด (ไมโครวัตต์)	14.90	14.24	7.94
ค่าเฉลี่ยกำลังไฟฟ้า (ไมโครวัตต์)	8.7±2.9*	1.6±2.5*	5.5±1.6*
ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (มิลลิแอมแปร์ต่อลูกบาศก์เมตร)	1845.37±299.73*	678.73±440.64*	1457.86±235.91*
ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า (มิลลิวัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร)	174.72±58.42*	32.66±50.42*	109.03±31.85*
พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ทั้งหมดใน ระยะเวลา 120 ชั่วโมง (มิลลิวัตต์ ชั่วโมง)	1.048	0.196	0.654

* ค่า Standard deviation: SD



รูปที่ 23 การกำจัดตะกอนและผลิตไฟฟ้าของ SMFC

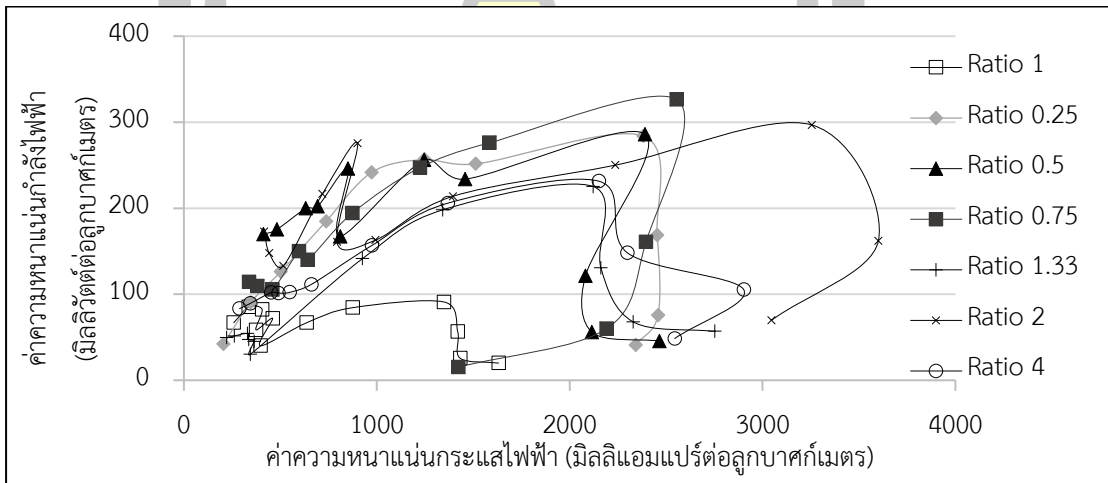
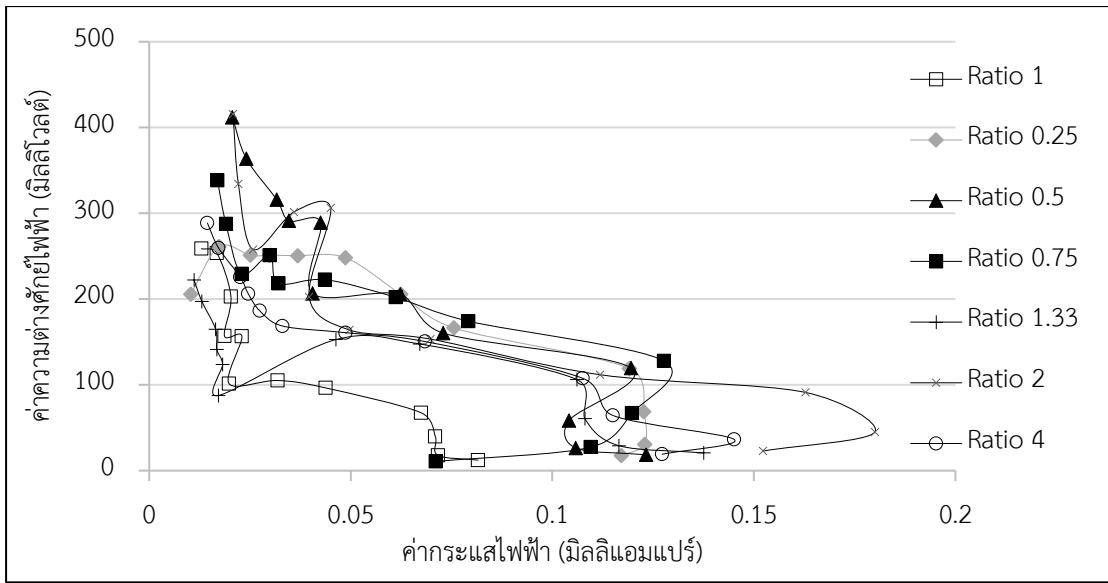
ตารางที่ 9 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของการศึกษาระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า

ค่าทางการบำบัด	ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า (ซม.)		
	4	6	8
อัตราการกำจัดกากตะกอน (กก.VS ต่อลิตรต่อวัน)	0.0501	0.0458	0.0474
อัตราการกำจัดกากตะกอน (กก.TS ต่อลิตรต่อวัน)	0.0614	0.0533	0.0489
การกำจัดกากตะกอนทั้งหมดในระยะเวลา 120 ชั่วโมง (กรัม VS)	12.51	11.45	11.84
การกำจัดกากตะกอนทั้งหมดในระยะเวลา 120 ชั่วโมง (กรัม TS)	15.35	13.32	12.22
สัดส่วนพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ต่อมวลของแข็งระเหยง่ายที่ถูกกำจัด (มิลลิวัตต์ชั่วโมงต่อกรัม VS)	83.77	17.11	55.24
สัดส่วนพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ต่อมวลของแข็งแขวนลอยที่ถูกกำจัด (มิลลิวัตต์ชั่วโมงต่อกรัม TS)	68.31	14.71	53.53
พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ตลอดการทดลอง (มิลลิวัตต์ชั่วโมง)	1.048	0.196	0.654
ประสิทธิภาพการกำจัดกากตะกอน (TS) (%)	33.94	29.45	27.02
ประสิทธิภาพการกำจัดกากตะกอน (VS) (%)	39.55	31.20	32.27

4.1.2 ผลของขนาดของขั้วไฟฟ้า

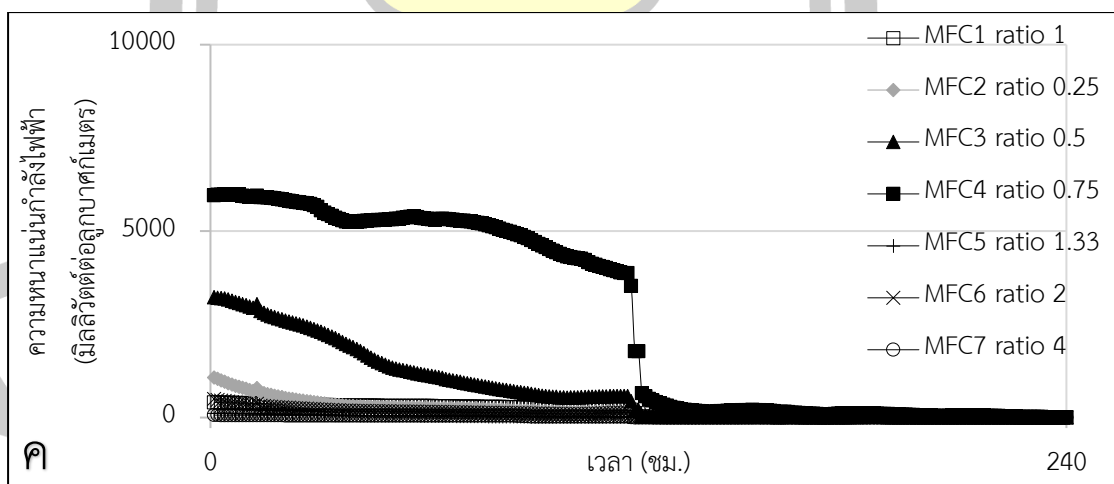
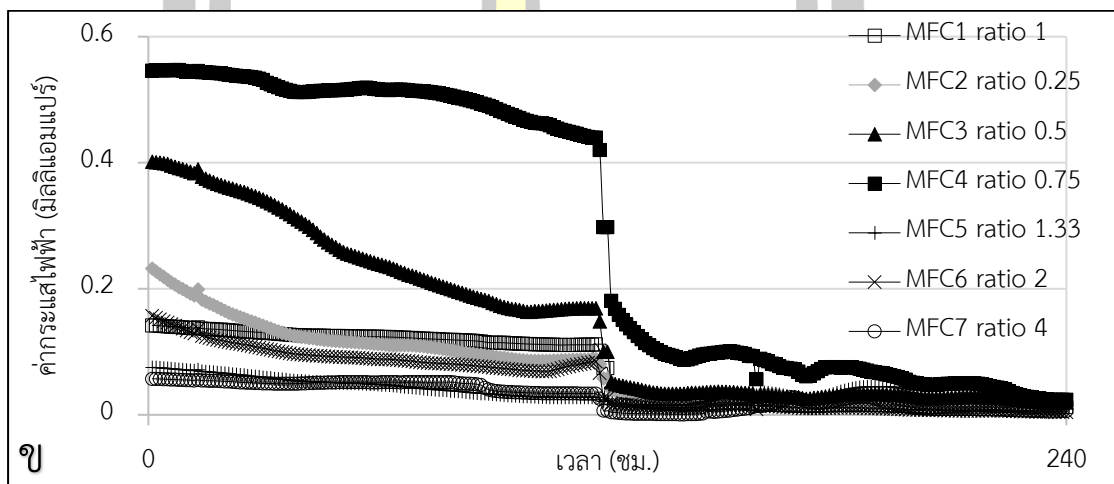
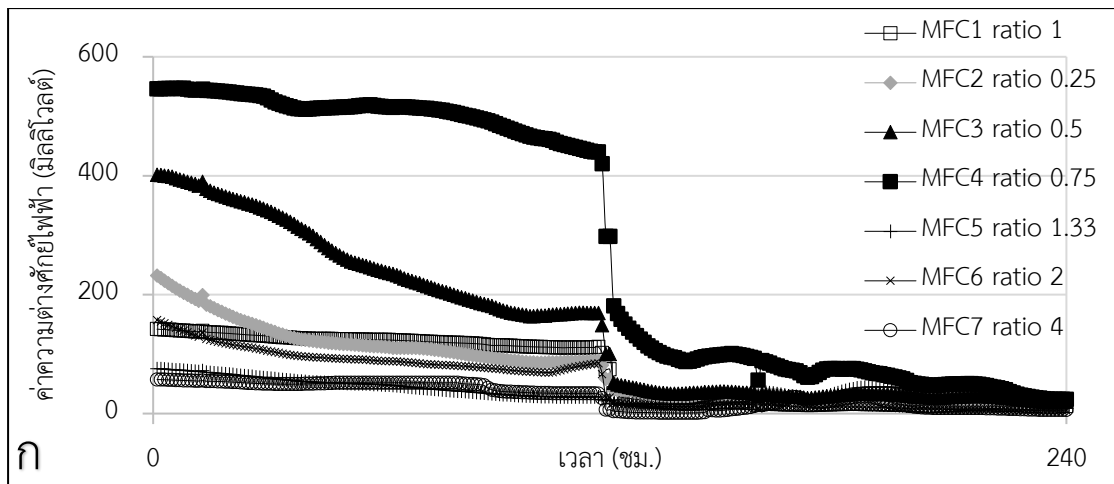
ผลการทำโพลาริเซชัน ก่อนเริ่มเดินระบบ เป็นดังแสดงในรูปที่ 24 จากรูปพบว่าค่าความต้านทานภายนอกที่ทำให้ SMFC ผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุดคือ 1000 โอห์ม ทั้งกรณี SMFC₁, (พื้นที่แอโนด/พื้นที่แคโทด = 1) SMFC₂, (พื้นที่แอโนด/พื้นที่แคโทด = 0.25) SMFC₃, (พื้นที่แอโนด/พื้นที่แคโทด = 0.5) SMFC₄, (พื้นที่แอโนด/พื้นที่แคโทด = 0.75) SMFC₅, (พื้นที่แอโนด/พื้นที่แคโทด = 1.33) SMFC₆, (พื้นที่แอโนด/พื้นที่แคโทด = 2) และ SMFC₇, (พื้นที่แอโนด/พื้นที่แคโทด = 4) โดยพบว่าค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ SMFC ผลิตได้ในการทดลองโพลาริเซชันคือ 90.99 มิลลิวัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร 283.88 มิลลิวัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร 285.93 มิลลิวัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร 326.36 มิลลิวัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร 225.24 มิลลิวัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร 250.03 มิลลิวัตต์ต่อลูกบาศก์เมตรและ 231.45 มิลลิวัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร สำหรับ SMFC₁, SMFC₂, SMFC₃, SMFC₄, SMFC₅, SMFC₆, และ SMFC₇, ตามลำดับ

เมื่อนำตัวต้านทานภายนอก 1000 โอห์ม (พิจารณาจากผลการทดลองโพลาริเซชัน) มาเชื่อมต่อขั้วแอโนดเข้ากับขั้วแคโทดของ SMFC แต่ละถัง แล้วเดินระบบอย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิห้อง พบว่าได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 25 SMFC ทุกถังที่ทำการทดลองมีแนวโน้มที่คล้ายกัน คือ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ค่ากระแสไฟฟ้า และค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า ในช่วงแรกมีแนวโน้มคงที่และลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อเดินระบบมาถึง 120 ชั่วโมงจนเข้าสู่สภาวะที่คงที่ ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากการทดลองนี้ไม่มีการเติมสารเคมีหรือสารอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ทำให้จุลินทรีย์ย่อยสลายสารอินทรีย์อย่างรวดเร็ว ซึ่งดูได้จาก “ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า \pm ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน” ที่ผลิตได้มีปริมาณสูงเมื่อเทียบกับค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากงานอื่น ของ Erable 2013 และค่ากำลังไฟฟ้าที่เขาผลิตได้ เท่ากับ 23 มิลลิวัตต์ต่อตารางเมตร) คือ 25.81 ± 25.70 , 28.87 ± 38.10 , 123.69 ± 161.49 , 435.40 ± 425.08 , 5.56 ± 4.67 , 15.73 ± 19.09 และ 4.14 ± 3.93 มิลลิวัตต์ต่อตารางเมตรสำหรับ SMFC1, SMFC2, SMFC3, SMFC4, SMFC5, SMFC6, และ SMFC7 ตามลำดับดังแสดงในตารางที่ 10 จากกราฟเห็นได้ว่าเมื่อค่าอัตราส่วนระหว่างขนาดพื้นที่ขั้วแอโนด/พื้นที่แคโทดมีค่าไม่เกิน 1 (0.25, 0.5, 0.75, 1) กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้มีค่ามากกว่ากรณีอัตราส่วนดังกล่าวมีค่าเกิน 1 ผลนี้แสดงให้เห็นว่าพื้นที่ขั้วแคโทดควรมีขนาดใหญ่กว่าพื้นที่ขั้วแอโนดจึงทำให้ผลิตกำลังไฟได้สูง ที่เป็นเช่นนี้อธิบายได้ว่า ขนาดของขั้วไฟฟ้าแคโทดใหญ่กว่าขนาดของขั้วไฟฟ้าแอโนด จะส่งผลให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงขึ้น ซึ่งผลที่เกิดขึ้นคือ เลือกใช้ขนาดขั้วของขั้วไฟฟ้าแคโทดให้มีขนาดใหญ่กว่าขั้วไฟฟ้าแอโนด เพราะเกิดสภาวะไร้อากาศขึ้น ทำให้เกิดการผลิตก๊าซมีเทนมากกว่าการออกซิเดชันของสารอินทรีย์ (Sasaki et al., 2013) ทั้งนี้เมื่อนำค่าเฉลี่ยความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการทดลองนี้ทั้ง 7 ค่ามาทดสอบความแตกต่างด้วยวิธีทางสถิติ one-way-ANOVA ที่ ระดับความเชื่อมั่น 95% พบว่า ข้อมูลทั้ง 7 ชุดมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ($P < 0.05$) แต่ยังไม่สามารถระบุได้ว่าชุดใดบ้างที่แตกต่างกัน จึงนำข้อมูลที่ละชุดมาทดสอบด้วยวิธีทางสถิติ t-test แบบ 1-tailed พบว่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จาก SMFC4, นั้นมีค่าสูงกว่า SMFC ทั้ง 6 ถังอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($P < 0.05$) จึงกล่าวได้ว่าเมื่อพื้นที่แอโนดมีค่าเป็น 0.75 เท่าของพื้นที่แคโทด (SMFC4) SMFC จะผลิตความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด ผลนี้สอดคล้องกับคำอธิบายในรายงานของ Ueoka และคณะ (2016) ที่ว่า การเพิ่มขึ้นของขนาดขั้วแอโนดให้เพียงพอต่อความจุของแบคทีเรียเป็นสิ่งสำคัญแต่ต้องไม่ใหญ่เกินกว่าขั้วไฟฟ้าแคโทด เพื่อให้ขั้วแคโทด สามารถรับอิเล็กตรอนที่จ่ายมาจากขั้วแอโนดได้อย่างเพียงพอ (Ueoka et al., 2016)



รูปที่ 24 ผลการทดลองโพลาริเซชันที่ค่าความต้านทานภายนอก 150 - 20000 โอห์ม





รูปที่ 25 การเปลี่ยนแปลงของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (ก) และการเปลี่ยนแปลงค่าของ กระแสไฟฟ้า (ข) และค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า (ค) ที่อัตราส่วนของขนาดขั้วไฟฟ้า 7

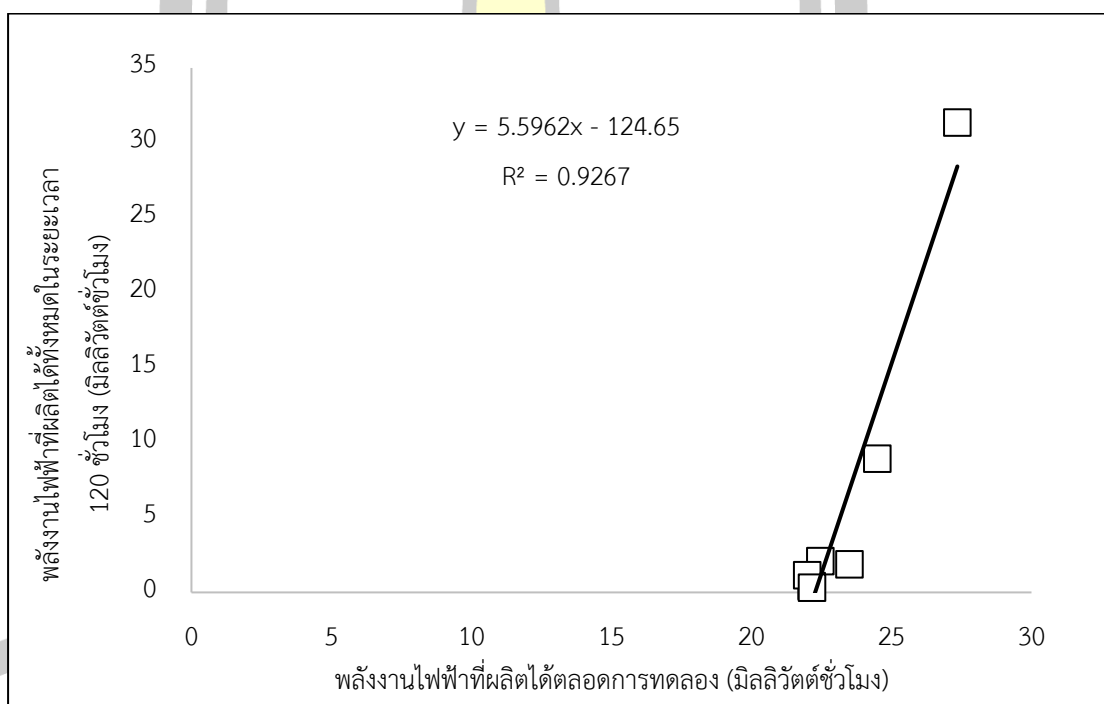
รูปแบบ

ตารางที่ 10 เปรียบเทียบค่าทางไฟฟ้าของการศึกษาขนาดของขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทด

ค่าทางไฟฟ้า	ขนาดของขั้วไฟฟ้าแคโทดและแอโนด (อัตราส่วน แคโทด : แอโนด)						
	1	0.25	0.5	0.75	1.33	2	4
ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุด (มิลลิโวลต์)	141.96	232.07	401.79	547.04	75.53	157.48	57.27
ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุด (มิลลิแอมแปร์)	0.14	0.23	0.40	0.55	0.08	0.16	0.06
ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด (ไมโครวัตต์)	20.15	53.85	161.43	299.26	5.71	24.80	3.28
ค่าเฉลี่ยกำลังไฟฟ้า (ไมโครวัตต์)	7.74 ±7.71	8.66 ±11.43	37.11 ±48.45	130.62 ±127.52	1.67 ±1.40	4.72 ±5.73	1.24 ±1.18
ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (มิลลิแอมแปร์ต่อลูกบาศก์เมตร)	1390.75 ±1080.8 0*	1467.8 4±114 7.07*	2885.03 ±2558.5 3*	5755.41 ±4382.2 2*	751.5 4±31 9.85*	1040.59 ±898.92 *	582.44 ±397.2 5*
ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า (มิลลิวัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร)	154.87± 154.19*	173.24 ±228.5 8*	742.11± 968.91*	2612.43 ±2550.4 6*	33.33 ±28.0 0*	94.38±1 14.53*	24.82± 23.57*
ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า (มิลลิวัตต์ต่อตารางเมตร)	25.81±2 5.70*	28.87± 38.10*	123.69± 161.49*	435.40± 425.08*	5.56± 4.67*	15.73±1 9.09*	4.14±3 .93*
พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ตลอดการทดลอง (มิลลิวัตต์ชั่วโมง)	1.858	2.079	8.905	31.349	0.400	1.133	0.298

* Standard deviation : SD

ในส่วนของการประสิทธิผลการบำบัดหลังการเริ่มเดินระบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ด้วยกากตะกอนส่วนเกิน โดยขนาดของขั้วไฟฟ้าที่ต่างกัน พบว่า นอกจากระบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์จะสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้แล้วยังสามารถบำบัดกากตะกอนส่วนเกินควบคู่กันไปได้อีกด้วย โดยนำกากตะกอนส่วนเกินทำการวิเคราะห์อัตราการย่อยสลายของสารอินทรีย์ จากปริมาณ 655.53 กรัมต่อลิตร ให้เหลือ 483.71 กรัมต่อลิตร ภายในระยะเวลา 240 ชม. ซึ่งคิดเป็นประสิทธิผลการบำบัดร้อยละ 81.86 โดยมีอัตราส่วนของขั้วไฟฟ้า เท่ากับ 0.75 ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 11 เมื่อนำค่าปริมาณของแข็งระเหยง่ายที่ถูกกำจัดทั้งหมดกับค่าพลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่ SMFC แต่ละถังผลิตได้ลงในกราฟพบว่าแปรผันตามกัน อธิบายได้ว่าเมื่อตะกอนเหลือทิ้งถูกจุลินทรีย์ย่อยสลายได้มาก จำนวนประจุที่เกิดใน SMFC ก็ย่อมมาก ทำให้ SMFC สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้มากตามไปด้วย ดังแสดงในรูปที่ 26 แสดงแนวโน้มเป็นเชิงเส้น ($y=5.5962x - 124.65$, $R^2=0.9267$)



รูปที่ 26 การกำจัดตะกอนและผลิตไฟฟ้าของ SMFC

ตารางที่ 11 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของการศึกษาขนาดข้าวไฟฟ้า

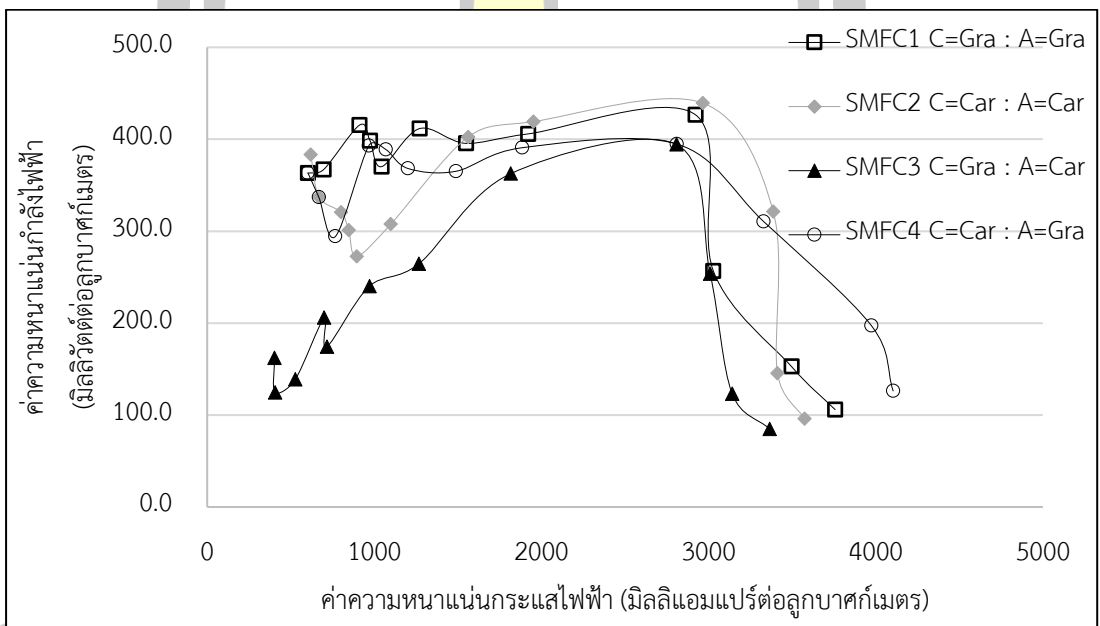
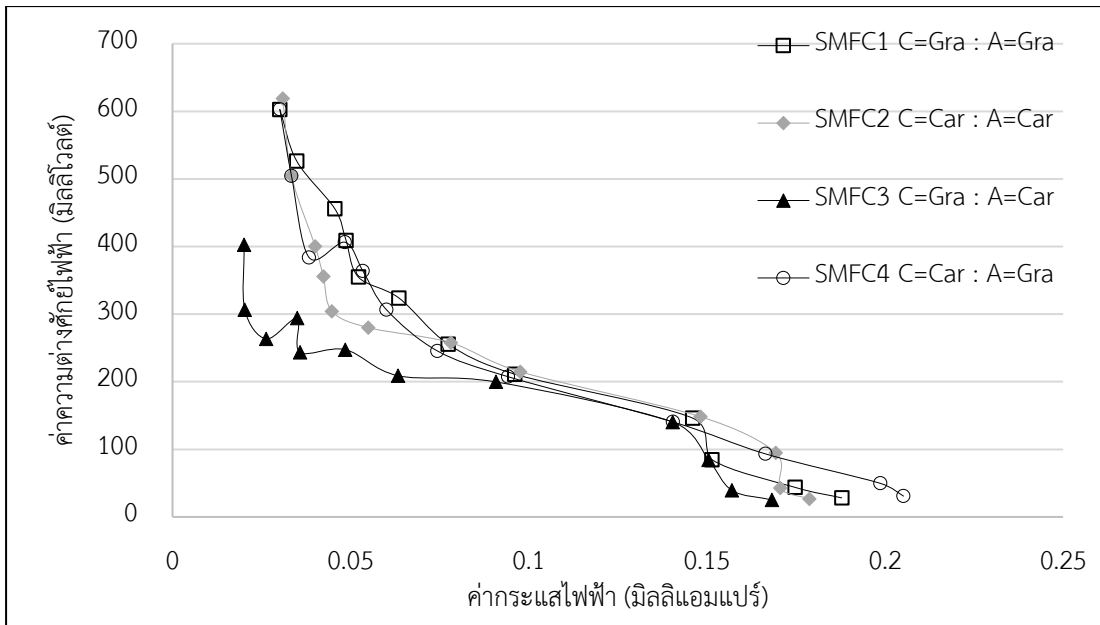
ค่าการบำบัด	อัตราส่วนของขนาดข้าวไฟฟ้า						
	1	0.25	0.5	0.75	1.33	2	4
อัตราการกำจัดกากตะกอน (กก.VS ต่อลิตรต่อวัน)	0.0546	0.0450	0.0449	0.0547	0.0443	0.0547	0.0443
อัตราการกำจัดกากตะกอน (กก.TS ต่อลิตรต่อวัน)	0.0620	0.0517	0.0517	0.0623	0.0516	0.0617	0.0516
การกำจัดกากตะกอนทั้งหมดในระยะเวลา 240 ชั่วโมง (กรัม TS)	30.98	25.85	25.83	31.14	25.81	30.85	25.80
การกำจัดกากตะกอนทั้งหมดในระยะเวลา 240 ชั่วโมง (กรัม VS)	23.50	22.47	24.50	27.35	22.15	22.00	22.16
สัดส่วนพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ต่อมวลของแข็งระเหยง่ายที่ถูกกำจัด (มิลลิวัตต์ชั่วโมงต่อกรัม VS)	79.08	396.32	84.85	1146.22	18.06	51.48	13.44
สัดส่วนพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ต่อมวลของแข็งทั้งหมดที่ถูกกำจัด (มิลลิวัตต์ชั่วโมงต่อกรัม TS)	59.99	344.44	80.48	1006.70	15.50	36.72	11.55
พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ตลอดการทดลอง (มิลลิวัตต์ชั่วโมง)	1.858	2.079	8.905	31.349	0.400	1.133	0.298
ประสิทธิภาพการกำจัดกากตะกอน (TS) (%)	83.46	69.65	69.59	83.89	69.53	83.10	69.50

ประสิทธิภาพการกำจัด							
กากตะกอน (VS) (%)	83.28	68.63	68.55	83.45	67.58	83.37	67.62

4.1.3 ผลของวัสดุที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้า

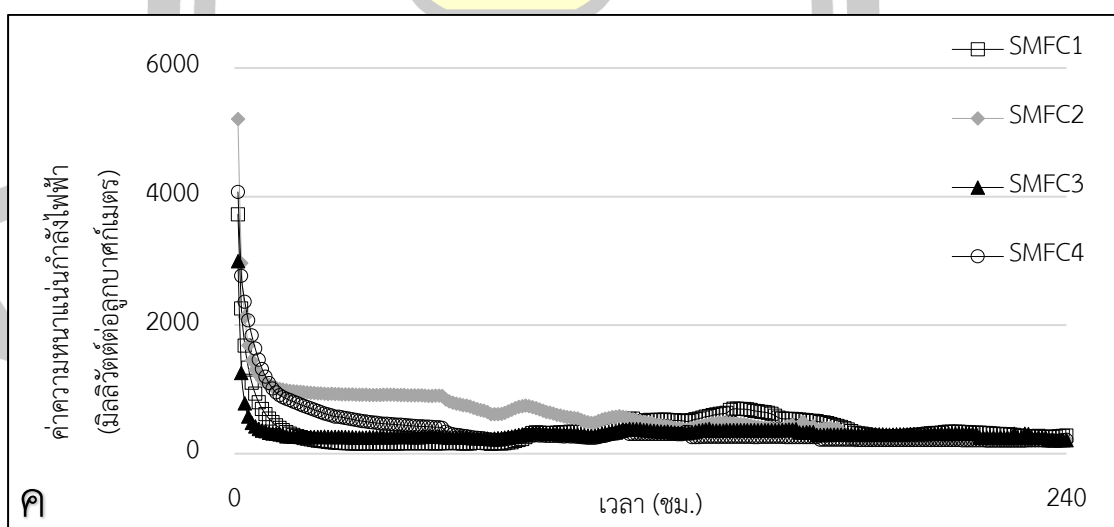
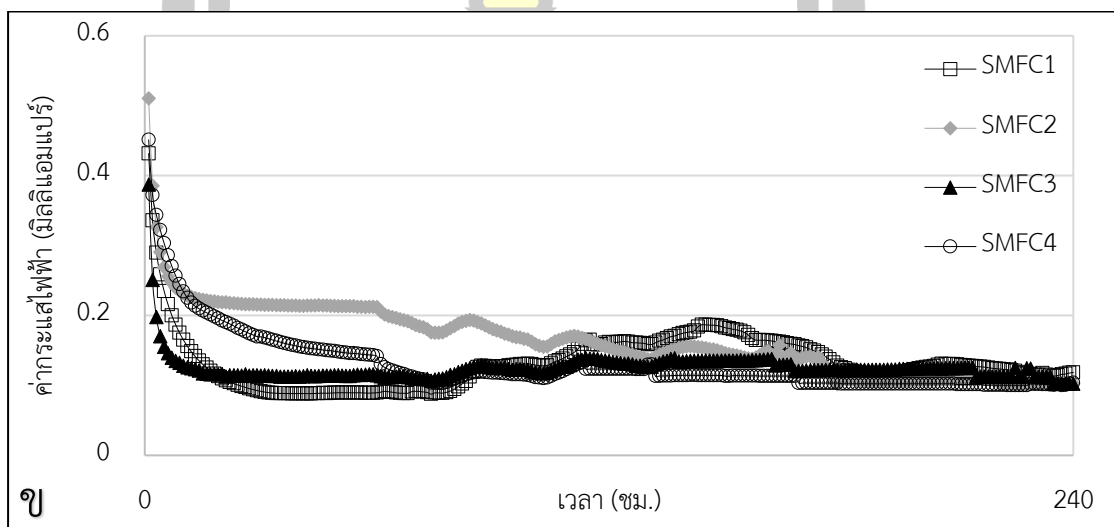
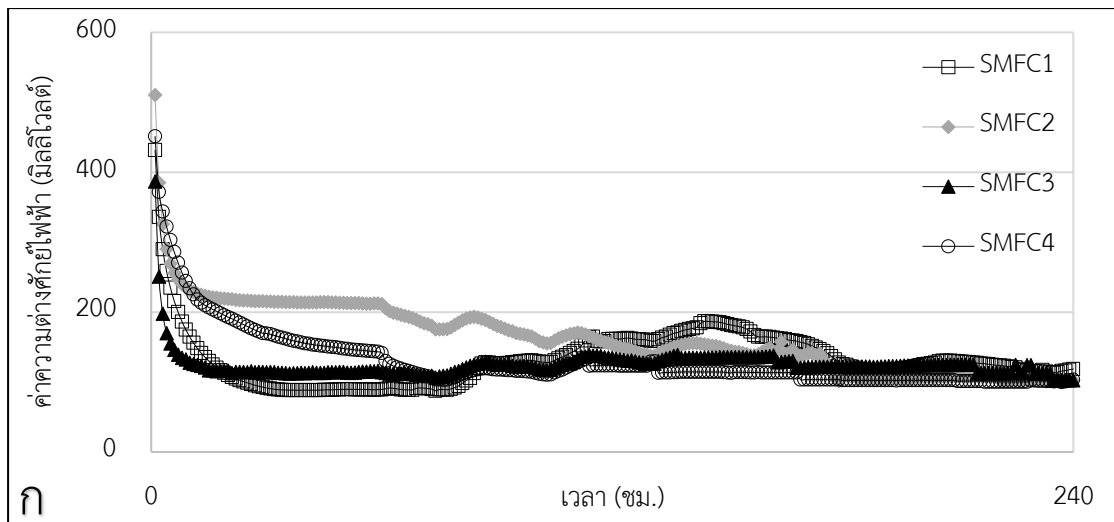
ผลการทำโพลาริเซชันก่อนเริ่มเดินระบบเป็นดังแสดงในรูปที่ 27 จากรูปพบว่าค่าความต้านทานภายนอกที่ทำให้ SMFC ผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุดคือ 1000 โอห์ม ทั้งกรณี SMFC_{1m} (ขั้วแอโนดและขั้วแคโทดทำจากแผ่นแกรไฟต์) SMFC_{2m} (ขั้วแอโนดและขั้วแคโทดทำจากผ้าคาร์บอน) SMFC_{3m} (ขั้วแอโนดทำจากผ้าคาร์บอน และขั้วแคโทดทำจากแผ่นแกรไฟต์) SMFC_{4m} (ขั้วแอโนดทำจากแผ่นแกรไฟต์ ขั้วแคโทดทำจากผ้าคาร์บอน) โดยพบว่าค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ SMFC ผลิตได้ในการทดลองโพลาริเซชันคือ 426.67 มิลลิวัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร 439.44 มิลลิวัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร 394.27 มิลลิวัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร และ 394.81 มิลลิวัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร สำหรับ SMFC_{1m}, SMFC_{2m}, SMFC_{3m}, SMFC_{4m} ตามลำดับ

เมื่อนำตัวต้านทานภายนอก 1000 โอห์ม (พิจารณาจากผลการทดลองโพลาริเซชัน) มาเชื่อมขั้วแอโนดเข้ากับขั้วแคโทดของ SMFC แต่ละถัง แล้วเดินระบบอย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิห้อง พบว่าได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 28 SMFC ทุกถังที่ทำการทดลองมีแนวโน้มที่คล้ายกัน คือ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ค่ากระแสไฟฟ้า และค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า ในช่วงแรกมีแนวโน้มคงที่และลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเดินระบบมาถึง 12 ชั่วโมงจนเข้าสู่สภาวะที่คงที่ ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากการทดลองนี้ไม่มีการเติมสารเคมีหรือสารอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ทำให้จุลินทรีย์ย่อยสลายสารอินทรีย์อย่างรวดเร็ว “ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า±ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน” ที่ผลิตได้ คือ $384.07 \pm 318.67^*$, $589.09 \pm 456.35^*$, $317.91 \pm 193.19^*$ และ $387.84 \pm 408.26^*$ มิลลิวัตต์ต่อลูกบาศก์เมตรสำหรับ SMFC_{1m}, SMFC_{2m}, SMFC_{3m} และ SMFC_{4m} ตามลำดับดังแสดงในตารางที่ 12 ทั้งนี้เมื่อนำค่าเฉลี่ยความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการทดลองนี้ทั้ง 4 ค่ามาทดสอบความแตกต่างด้วยวิธีทางสถิติ one-way-ANOVA ที่ ระดับความเชื่อมั่น 95% พบว่า ข้อมูลทั้ง 4 ชุดมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ($P < 0.05$) แต่ยังไม่ได้ว่าคู่ใดบ้างที่แตกต่างกัน จึงนำข้อมูลที่ละชุดมาทดสอบต่อด้วยวิธีทางสถิติ t-test แบบ 1-tailed พบว่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จาก SMFC_{2m} นั้นมีค่าสูงกว่า SMFC ทั้ง 3 ถังอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($P < 0.05$) จึงกล่าวได้ว่าการใช้ขั้วไฟฟ้าทั้งแอโนดและแคโทดที่ทำจากผ้าคาร์บอน (SMFC_{2m}) ให้ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงกว่าการใช้แผ่นแกรไฟต์เข้ามาทำเป็นขั้วไฟฟ้า



รูปที่ 27 ผลการทดลองโพลาริเซชันที่ค่าความต้านทานภายนอก 150 - 20000 โอห์ม





รูปที่ 28 การเปลี่ยนแปลงของความต่างศักย์ไฟฟ้า (ก) การเปลี่ยนแปลงค่าของกระแสไฟฟ้า (ข) และค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า (ค) ที่วัสดุของขั้วไฟฟ้าแตกต่างกัน

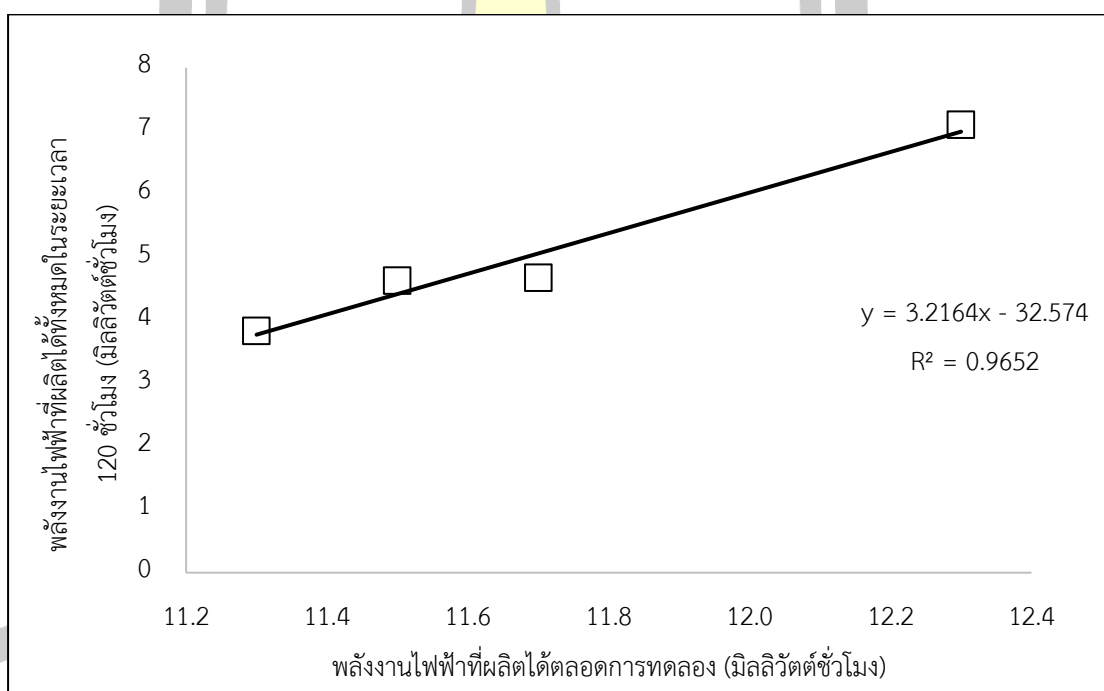
ตารางที่ 12 เปรียบเทียบค่าทางไฟฟ้าของการศึกษาวัสดุที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้า

ค่าทางไฟฟ้า	วัสดุที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้า (แคโทด : แอโนด)			
	แผ่นแกรไฟต์ : แผ่นแกรไฟต์	ผ้าคาร์บอน : ผ้าคาร์บอน	แผ่นแกรไฟต์ : แผ่นแกรไฟต์	ผ้าคาร์บอน : แผ่นแกรไฟต์
ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุด (มิลลิโวลต์)	431.53	510.31	386.99	451.21
ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุด (มิลลิแอมแปร์)	0.43	0.51	0.39	0.45
ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด (ไมโคร วัตต์)	186.22	260.41	149.76	203.59
ค่าเฉลี่ยกำลังไฟฟ้า (ไมโคร วัตต์)	19.20 ±15.93*	29.45 ±22.82*	15.90 ±9.66*	19.39 ±20.41*
ค่าเฉลี่ยความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า (มิลลิแอมแปร์ต่อ ลูกบาศก์เมตร)	2648.70 ±817.66*	3271.67 ±1040.43*	2483.49 ±437.41*	2618.83 ±949.92*
ค่าเฉลี่ยความหนาแน่น กำลังไฟฟ้า (มิลลิวัตต์ต่อ ลูกบาศก์เมตร)	384.07 ±318.67*	589.09 ±456.35*	317.91 ±193.19*	387.84 ±408.26*
พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ตลอด การทดลอง (มิลลิวัตต์ชั่วโมง)	4.628	7.099	3.831	4.674

* Standard deviation: SD



ในส่วนของการกำจัดตะกอนส่วนเกินนั้นพบว่า SMFC แต่ละถังสามารถกำจัดกากตะกอนส่วนเกินได้ โดย SMFC_{2m} ที่ใช้ทำวัสดุทำขั้วไฟฟ้าแคโทดและขั้วไฟฟ้าแอโนด ที่ทำจากผ้าคาร์บอนนั้น สามารถกำจัด VS ได้ 55.88 % ซึ่งสูงกว่า SMFC_{1m} (55.12 %), SMFC_{3m} (54.71 %) และ SMFC_{4m} (54.69 %) ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 13 เมื่อนำปริมาณ VS ถูกกำจัดทั้งหมด (กรัม VS) กับ ค่าพลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่ SMFC แต่ละถังผลิตได้ (มิลลิวัตต์·ชั่วโมง) มาพล็อตลงในกราฟพบว่าแปรผันตามกันในรูปแบบสมการเชิงเส้น ($y=3.2164x - 32.574$, $R^2=0.9652$) ดังแสดงในรูปที่ 29 (ผลสอดคล้องกับที่พบในการทดลอง 4.1.2) อธิบายได้ว่า เมื่อตะกอนเหลือทิ้งถูกจุลินทรีย์ย่อยสลายได้มาก จำนวนประจุที่เกิดขึ้นใน SMFC ก็ย่อมมาก ทำให้ SMFC สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้มากตามไปด้วย



รูปที่ 29 การกำจัดตะกอนและผลิตไฟฟ้าของ SMFC

ตารางที่ 13 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของวัสดุที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้า

ค่าการบำบัด	วัสดุที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้า (แคโทด : แอโนด)			
	แผ่นแกรไฟต์ : แผ่นแกรไฟต์	แผ่นแกรไฟต์ : แผ่นแกรไฟต์	แผ่นแกรไฟต์ : แผ่นแกรไฟต์	แผ่นแกรไฟต์ : แผ่นแกรไฟต์
อัตราการกำจัดกากตะกอน (กก.VS ต่อลิตรต่อวัน)	0.0251	0.0255	0.0249	0.0249
อัตราการกำจัดกากตะกอน (กก.TS ต่อลิตรต่อวัน)	0.0323	0.0332	0.0316	0.0320
การกำจัดกากตะกอนทั้งหมด ในระยะเวลา 240 ชั่วโมง (กรัม TS)	16.13	15.84	15.82	16.01
การกำจัดกากตะกอนทั้งหมด ในระยะเวลา 240 ชั่วโมง (กรัม VS)	11.50	12.30	11.30	11.70
สัดส่วนพลังงานไฟฟ้าที่ผลิต ได้ต่อมวลของแข็งระเหยง่าย ที่ถูกกำจัด (มิลลิวัตต์ชั่วโมง ต่อกรัม VS)	318.51	492.21	265.74	324.19
สัดส่วนพลังงานไฟฟ้าที่ผลิต ได้ต่อมวลของแข็งทั้งหมดที่ ถูกกำจัด (มิลลิวัตต์ชั่วโมงต่อ กรัม TS)	247.89	387.30	209.20	252.20
พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ตลอด การทดลอง (มิลลิวัตต์ชั่วโมง)	4.628	7.099	3.831	4.674
ประสิทธิภาพการกำจัดกาก ตะกอน (TS) (%)	59.48	61.16	58.34	59.04
ประสิทธิภาพการกำจัดกาก ตะกอน (VS) (%)	55.12	55.88	54.71	54.69

4.2 ผลการทดลองเพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อการย่อยกากตะกอนส่วนเกินและการผลิตกำลังไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์

กากตะกอนที่ใช้ในการทดลองเป็นกากตะกอนเหลือทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสีย โดยเมื่อวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ เบื้องต้น พบว่า กากตะกอนมีสีดำเข้ม กลิ่นเหม็น มีมวลตะกอนอยู่มาก เมื่อเก็บมาวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ทางเคมีในห้องปฏิบัติการ พบว่า ดังแสดงในตารางที่ 14 คือ มีค่าพีเอชประมาณ 6 - 8 ค่าซีไอดี 14,483 - 14,915 มิลลิกรัม COD ต่อกรัม TS (mgCOD/gTS) ค่าปริมาณของแข็งแขวนลอย 35.81 - 47.05 มิลลิกรัม SS ต่อกรัม TS (mgSS/gTS)

ตารางที่ 14 ค่าพารามิเตอร์เบื้องต้นของกากตะกอนส่วนเกินที่ใช้ในงานวิจัย

พารามิเตอร์	ปริมาณ	หน่วย
พีเอช	6 - 8	-
ซีไอดี	14,483 - 14,915	มิลลิกรัม COD ต่อกรัม TS
ของแข็งแขวนลอย	35.81 - 47.05	มิลลิกรัม SS ต่อกรัม TS

4.2.1 การผลิตไฟฟ้าของกากตะกอนเหลือทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียด้วยเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้องเดี่ยว

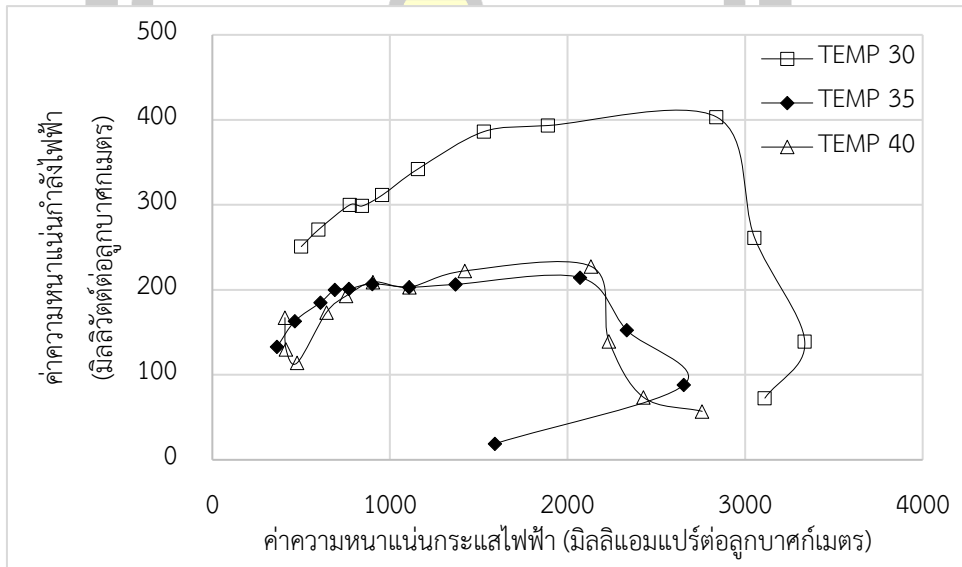
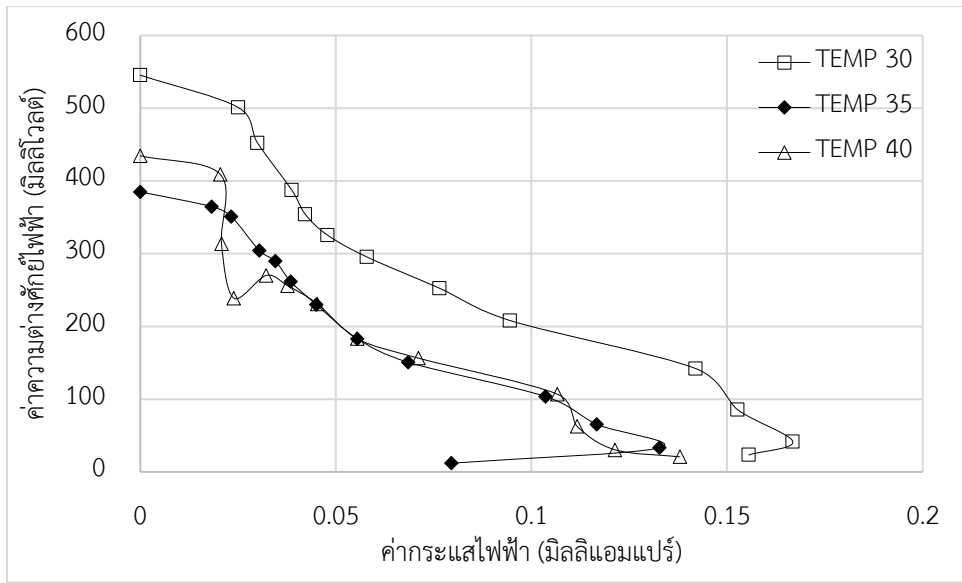
เมื่อเดินระบบย่อยกากตะกอนเหลือทิ้งด้วย SMFC ทั้ง 3 โดยการควบคุมอุณหภูมิของระบบ เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ให้มีค่า 30 องศาเซลเซียส (SMFC_{30C}) 35 องศาเซลเซียส (SMFC_{35C}) และ 40 องศาเซลเซียส (SMFC_{40C}) โดยใช้ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 4 เซนติเมตร ขนาดของขั้วไฟฟ้า แคโทดและแอโนด อัตราส่วน 0.75 (แคโทด 4 ตร.ซม. แอโนด 3 ตร.ซม.) วัสดุที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้าทั้งสองขั้วคือผ้าคาร์บอน สำหรับค่าความต้านทานภายนอกที่นำมาต่อกับขั้วไฟฟ้าของ SMFC แต่ละถังนั้น เลือกใช้ 1000 โอห์ม โดยพิจารณาจากผลการทดลอง polarization ในรูปที่ 30 ซึ่งค่าความต้านทานภายนอกที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดคือ 1000 โอห์ม ผลการทดลองเดินระบบเป็นเวลา 432 ชั่วโมงพบว่าค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าลดลงเรื่อยๆจนสิ้นสุดการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 31 โดยในช่วง 0-216 ชั่วโมงพบการลดลงอย่างชัดเจนอธิบายได้ว่าเป็นเพราะเป็นการทดลองแบบแบตช์ (Batch) เมื่ออาหารและสารประกอบต่างๆใน SMFC ถูกใช้ไปโดยไม่มีการเติมใหม่ การทำงานของจุลินทรีย์ในระบบก็อาจจะลดลงได้เนื่องจากขาดแคลนอาหารและสารประกอบเร่งปฏิกิริยา หลังจาก 216 ชั่วโมงเป็นต้นไป พบว่าค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า มีค่าค่อนข้างคงที่ทั้งในกรณี SMFC_{30C}, SMFC_{35C} และ SMFC_{40C} โดยค่าความ

ต่างศักย์ไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 30 มีแนวโน้มสูงที่สุด รองลงมาคือที่อุณหภูมิ 40 และ 35 องศาเซลเซียสตามลำดับ (ดูตาราง 15) ผลการทดลองข้างต้นแสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิไม่ได้มีอิทธิพลต่อการผลิตไฟฟ้าของ SMFC ในเชิงเดียว เช่น แปรผันตามหรือแปรผกผัน แม้หลายงานวิจัย เช่น งานวิจัยของ Larrosa-Guerrero et al. (2010) พบว่าเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์มีแนวโน้มผลิตความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าได้มากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเรียงลำดับจากมากไปน้อยได้ $35 > 20 \approx 30 > 15 > 8 > 4$ องศาเซลเซียส (Larrosa-Guerrero et al., 2010) แต่ก็มีงานวิจัยหลายงานที่ได้ผลการทดลองคล้ายคลึงกับงานวิจัยนี้ เช่น Ye, Song, Chen, Yan, & Jiang (2016) พบว่ามีความเป็นไปได้ที่เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์จะมีค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า ณ. อุณหภูมิต่ำมากกว่าอุณหภูมิสูง โดยเรียงลำดับจากมากไปน้อยได้ $4 > 25 > 15 > 35$ องศาเซลเซียสตามลำดับ (T. ran Ye et al., 2016) นอกจากนี้ งานวิจัยของ Li et al. (2014) รายงานว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการผลิตไฟฟ้าของ MFC ในงานของเขา คือ 20 องศาเซลเซียส ซึ่งผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงกว่าที่ 25, 30 และ 35 องศาเซลเซียส (Li et al., 2014)

จากผลดังกล่าวสันนิษฐานได้ว่าจุลินทรีย์ที่ผลิตไฟฟ้าได้ใน SMFC แต่ละถังของงานวิจัยนี้นั้นมีอุณหภูมิที่เหมาะสมในการผลิตไฟฟ้าอยู่ที่ 30 องศาเซลเซียส หากเดินระบบที่อุณหภูมิมากกว่า หรือน้อยกว่าค่าที่เหมาะสม ก็สามารถทำให้ SMFC ผลิตไฟฟ้าได้น้อยลง (Li et al., 2014)

ทั้งนี้ เมื่อทดลองนำค่าเฉลี่ยความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าในทุก 3 วันของการทดลอง (ในช่วง 0-288 ชม. ที่มีการลดลงอย่างชัดเจน) มาหาค่า Ln แล้วพล็อตกราฟโดยมีแกนนอนเป็นระยะเวลาเดินระบบแล้วพบว่า ปฏิกิริยาเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าเป็นปฏิกิริยาแบบลำดับที่ 1 (first order reaction) ดังแสดงในรูปที่ 32 โดยมีค่าคงที่ของอัตราเร็วในการทำปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 30, 35 และ 40 องศาเซลเซียส เท่ากับ 0.021 hr^{-1} ($R^2=0.9567$), 0.018 hr^{-1} ($R^2=0.9503$) และ 0.019 hr^{-1} ($R^2=0.9327$) ตามลำดับ ผลนี้แสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสนั้น นอกจาก SMFC จะผลิตพลังงานไฟฟ้าได้สูงแล้ว อัตราการเกิดปฏิกิริยาทางไฟฟ้ายังเร็วอีกด้วย

พูน ปรณ ทิโต ชีเว



รูปที่ 30 ผลการทดลองโพลาริเซชันที่ค่าความต้านทานภายนอก 150 - 20000 โอห์ม

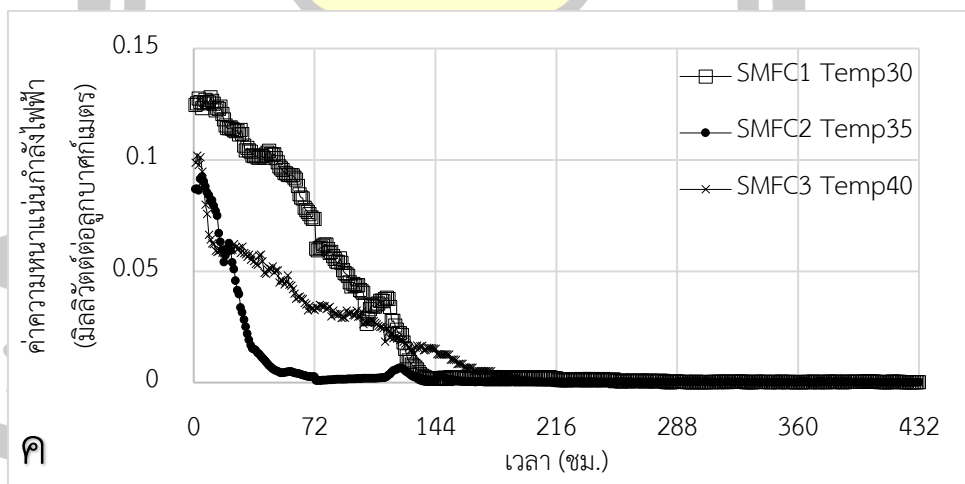
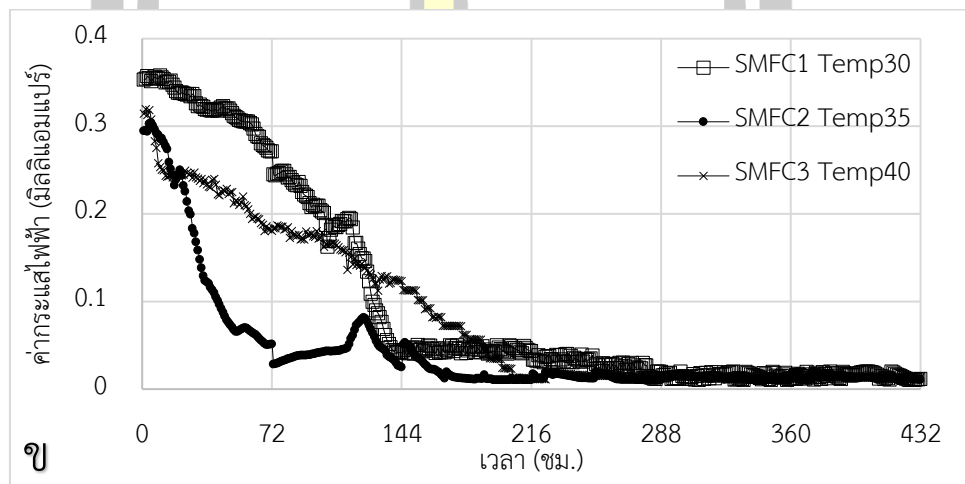
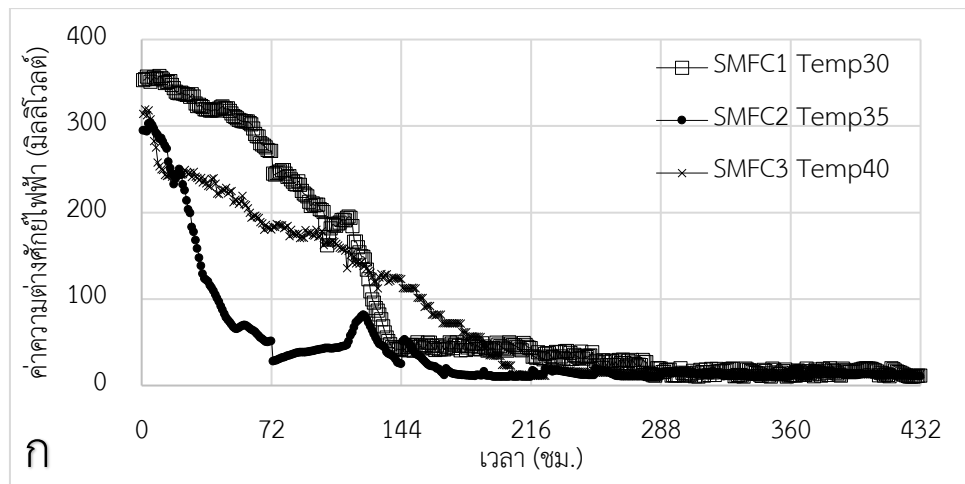


ตารางที่ 15 ค่าไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน

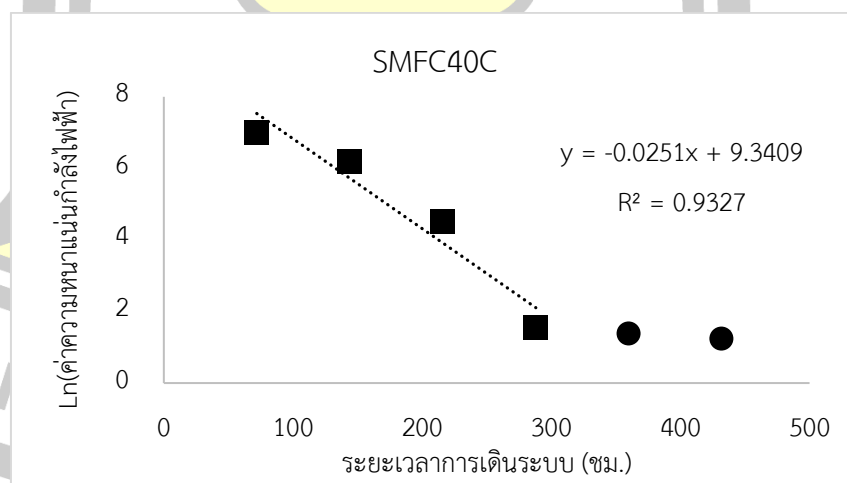
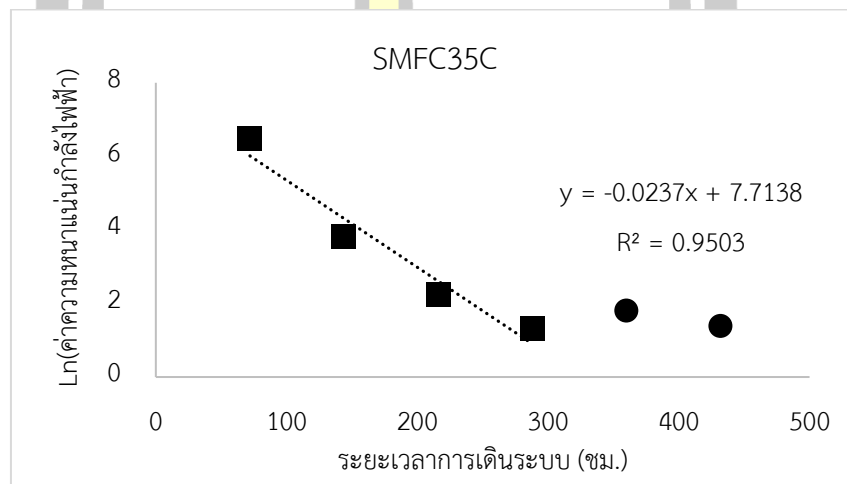
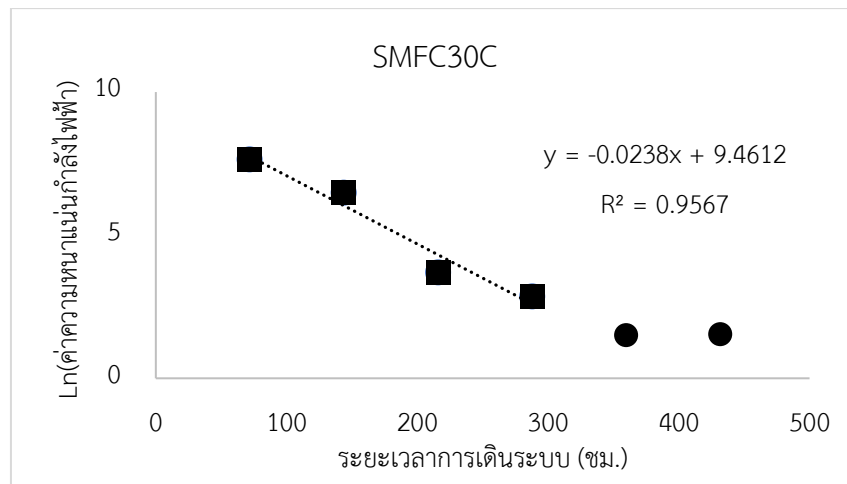
ค่าทางไฟฟ้า	เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์		
	30 องศาเซลเซียส	35 องศาเซลเซียส	40 องศาเซลเซียส
ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุด (มิลลิโวลต์)	357.75	304.01	319.25
ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุด (มิลลิแอมแปร์)	0.358	0.304	0.319
ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด (ไมโคร วัตต์)	127.98	92.42	101.92
ค่าเฉลี่ยกำลังไฟฟ้า (ไมโคร วัตต์)	23.46±39.55*	5.91±17.58*	14.23±21.71*
ค่าเฉลี่ยความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า (มิลลิแอมแปร์ต่อ ลูกบาศก์เมตร)	1979.19±2340.88*	862.06±1277.91*	1635.51±1739.11*
ค่าเฉลี่ยความหนาแน่น กำลังไฟฟ้า (มิลลิวัตต์ต่อ ลูกบาศก์เมตร)	469.21±791.06*	118.62±351.54*	284.62±434.15*
พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ตลอด การทดลอง (มิลลิวัตต์ชั่วโมง)	10.13	2.55	6.15

* Standard deviation: SD





รูปที่ 31 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (ก) ค่ากระแสไฟฟ้า (ข) และค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้า (ค) จากการเดินระบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ ในอุณหภูมิที่แตกต่างกัน

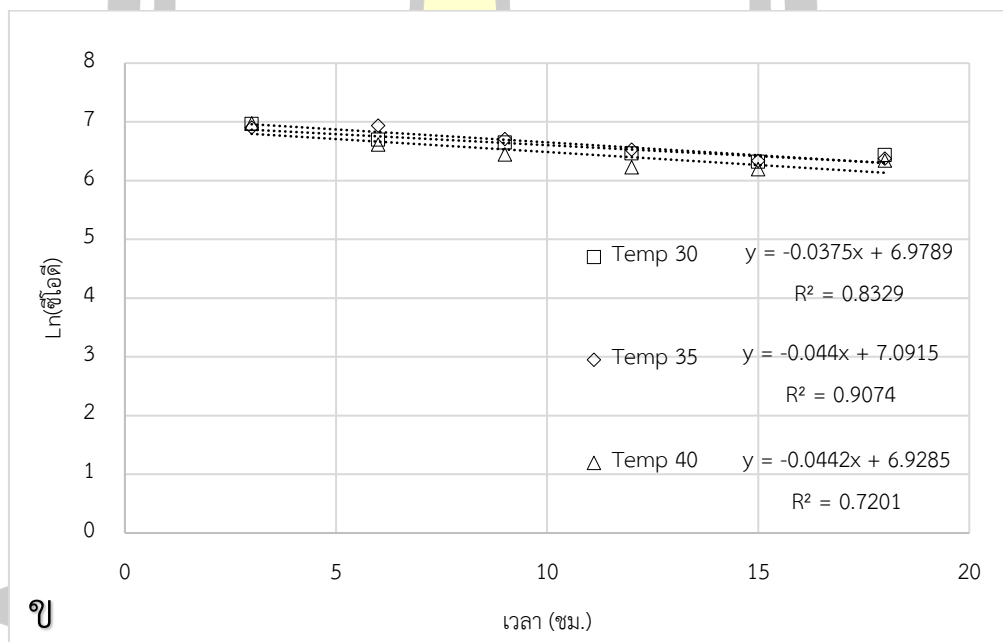
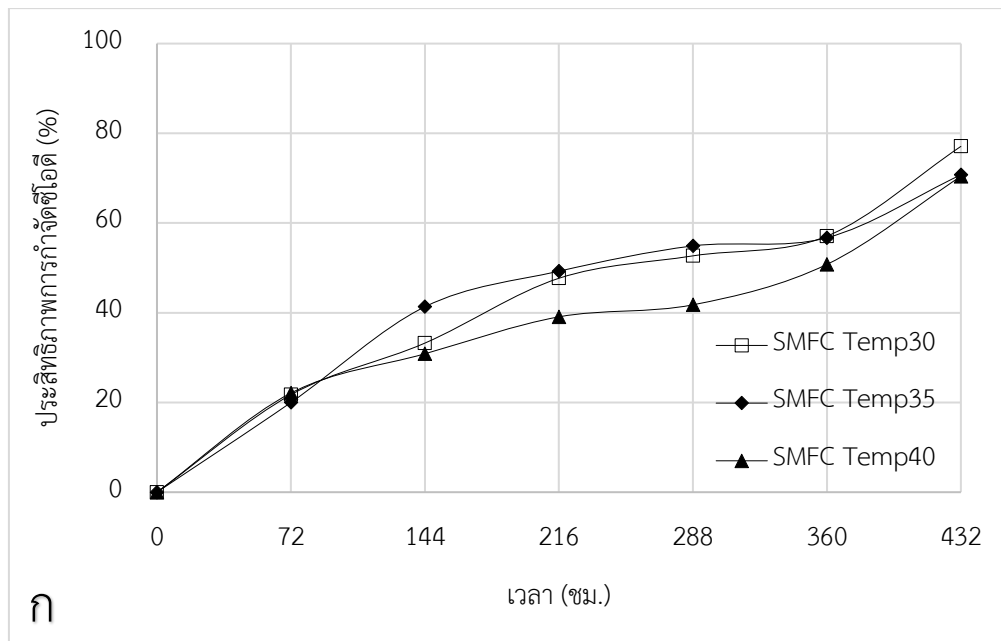


รูปที่ 32 จลศาสตร์ปฏิกิริยาของการผลิตกำลังไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์
ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน

4.2.2 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีและจุลศาสตร์ของปฏิกิริยา

จากผลการทดลองหาประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี เมื่อทดสอบด้วยวิธีทางสถิติ (t-test, 1-tailed, significant level 0.05) พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของ SMFC ในระหว่างการเดินระบบไปจนถึงสิ้นสุดการทดลอง ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และ อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส มีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ($P < 0.05$) แต่เมื่อสิ้นสุดการเดินระบบกลับพบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีสุดท้าย พบว่า ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส (77%) มีค่าสูงกว่าที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส (71%) และ 40 องศาเซลเซียส (72%) ดังแสดงในรูปที่ 33 และ ตารางที่ 16 เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าที่ SMFC ผลิตได้ซึ่งเรียงลำดับจากมากไปหาน้อยได้ $SMFC_{30C} > SMFC_{40C} > SMFC_{35C}$ ($p < 0.05$) แล้วสันนิษฐานว่า จุลินทรีย์ใน SMFC เจริญเติบโตได้ดีที่สุดที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงย่อยสลายกากตะกอนและผลิตความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าได้สูงที่สุดภายใต้อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ทั้งนี้อุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการกำจัดซีโอดีนั้น มีความแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับเงื่อนไขในการทดลองโดยไม่จำเป็นต้องแปรผันตามหรือแปรผกผันกับอุณหภูมิก็ได้ เช่น ในงานวิจัยของ Li et al. (2014) พบว่าอุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียสเหมาะสมที่สุดสำหรับ MFC ของเขาในการกำจัดซีโอดี กล่าวคือ ค่าอัตราเร็วในการกำจัดซีโอดีของ MFC ภายใต้อุณหภูมิต่างๆเรียงลำดับจากมากไปหาน้อยได้ $15 (2.159 \pm 0.006 \text{ kg m}^{-3} \text{ NC d}^{-1}) > 25 (2.125 \pm 0.010 \text{ kg m}^{-3} \text{ NC d}^{-1}) > 20 (2.093 \pm 0.005 \text{ kg m}^{-3} \text{ NC d}^{-1}) > 30 (2.027 \pm 0.006 \text{ kg m}^{-3} \text{ NC d}^{-1}) > 35 (2.018 \pm 0.006 \text{ kg m}^{-3} \text{ NC d}^{-1})$ ตามลำดับ (Li et al., 2014)

สำหรับอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยานั้น พบว่า จุลศาสตร์ของปฏิกิริยาที่เหมาะสมกับข้อมูลทดลองที่สุดคือ ปฏิกิริยาลำดับที่ 1 โดย $SMFC_{30C}$ มีค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 0.029 วัน^{-1} ($R^2 = 0.8329$) $SMFC_{35C}$ มีค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 0.029 วัน^{-1} ($R^2 = 0.9074$) และ $SMFC_{40C}$ มีค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 0.021 วัน^{-1} ($R^2 = 0.7201$) ซึ่งจะเห็นว่า ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ อุณหภูมิ 30 และ 35 องศาเซลเซียส ไม่แตกต่างกัน แต่ก็มากกว่าค่าที่ได้ภายใต้อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส



รูปที่ 33 ประสิทธิภาพการกำจัดซีไออดี (ก) และ อัตราการเกิดปฏิกิริยาการกำจัดซีไออดี (ข)

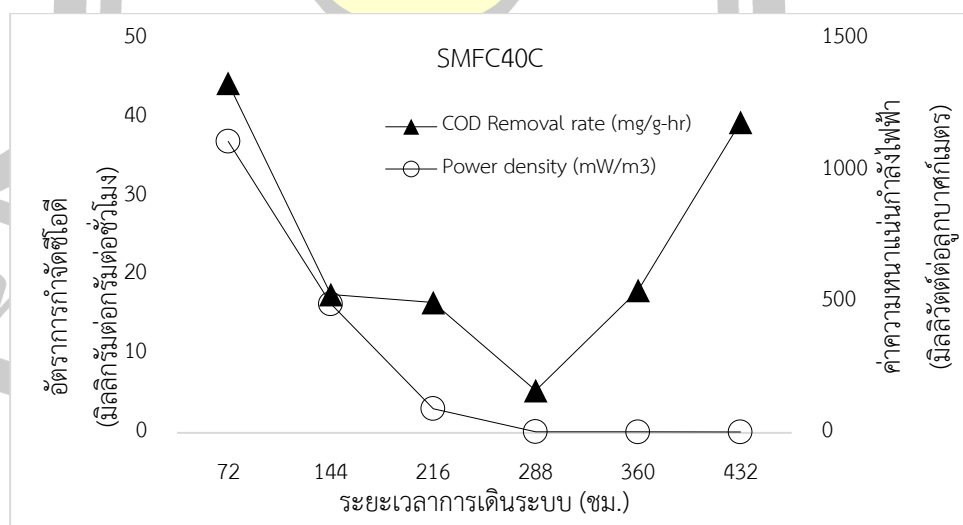
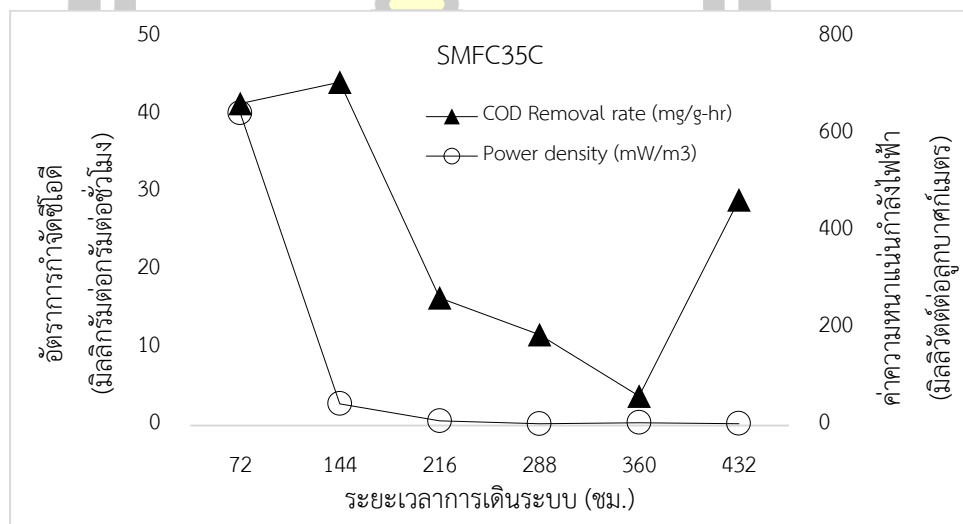
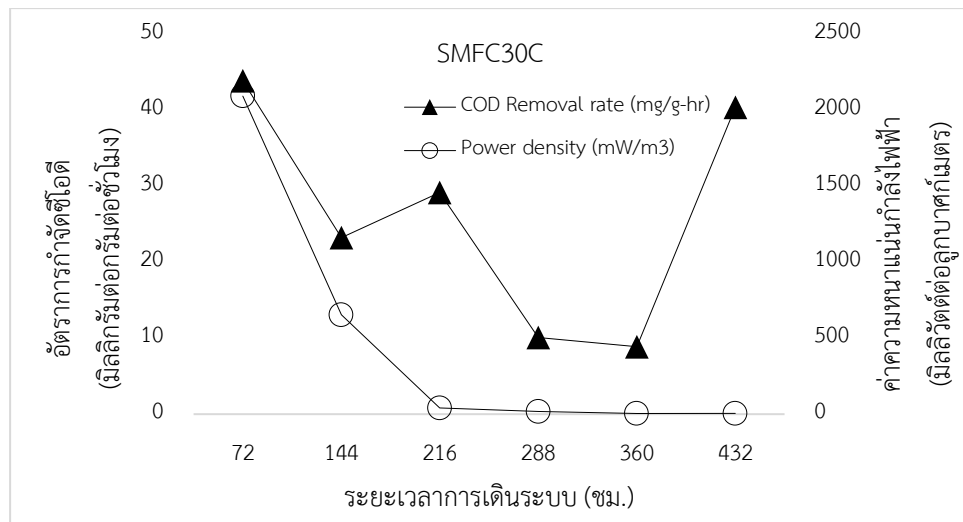
เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าและอัตราการกำจัดซีโอดีของ SMFC ในแต่ละช่วงเวลา ตลอดระยะเวลาทดลอง 432 ชั่วโมง ในรูปที่ 34 พบว่า พารามิเตอร์ทั้ง 2 ไม่มีรูปแบบความสัมพันธ์ที่ตายตัว ยกตัวอย่างเช่น SMFC30C มีค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้านั้นลดลงจาก 654.27 มิลลิวัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร ในชั่วโมงที่ 144 เหลือ 40.19 มิลลิวัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร ในชั่วโมงที่ 216 ในขณะที่อัตราการกำจัดซีโอดีเพิ่มขึ้นจาก 23.26 mgCOD/gTS-hr ในชั่วโมงที่ 144 เป็น 29.19 mgCOD/gTS -hr ในชั่วโมงที่ 216 ครั้นเมื่อเดินระบบไปจนถึง 360 ชั่วโมงกลับพบว่าค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าในชั่วโมงที่ 360 กับชั่วโมงที่ 432 แทบไม่เปลี่ยนแปลง ในขณะที่อัตราการกำจัดซีโอดีเพิ่มขึ้นอย่างมากจาก 8.89 mgCOD/gTS -hr ในชั่วโมงที่ 360 กลายเป็น 40.42 mgCOD/gTS -hr ในชั่วโมงที่ 432 เป็นต้น อธิบายได้ว่ากำลังไฟฟ้าจะมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง ไม่จำเป็นต้องสัมพันธ์กันกับประสิทธิภาพของการกำจัดซีโอดี (Park et al., 2018)

ตารางที่ 16 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีที่อุณหภูมิต่างกัน

รายละเอียด		เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์		
		30 องศาเซลเซียส	35 องศาเซลเซียส	40 องศาเซลเซียส
ซีโอดีขาเข้า	(mgCOD/gTS)	14,546 ± 2519*	14,915 ± 1174*	14,483 ± 2069*
	(mgCOD/LSludge)	58,182 ± 10077*	59,661 ± 4697*	57,931 ± 8276*
ซีโอดีขาออก	(mgCOD/gTS)	3,333 ± 1091*	4,364 ± 945*	4,286 ± 966*
	(mgCOD/LSludge)	13,333 ± 4364*	17,454 ± 3779*	17,143 ± 3865*
ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี (%)		77±6*	71±6*	70±2*

* Standard deviation: SD

พหุ ประสิทธิภาพ ชีวะ



รูปที่ 34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการทำกำจัดซีโอดีและค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า

เมื่อเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าของ SMFC_{30C} ในงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่น ๆ พบว่า SMFC ในงานวิจัยนี้ให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงมากที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 17 โดยค่าที่ได้จากงานวิจัยอื่น ๆ มีความแตกต่างกันมาก ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากความแตกต่างของปัจจัยต่าง ๆ ในการทำการทดลอง เช่น การออกแบบระบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ หัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ อาหารจุลินทรีย์ในระบบ ฯลฯ

ตารางที่ 17 การเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ผลิตได้โดยเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ของงานวิจัยอื่น ๆ กับงานวิจัยนี้

ประเภทของเสีย	รูปแบบเชื้อเพลิงจุลินทรีย์	กำลังไฟฟ้า	เอกสารอ้างอิง
ตะกอนเหลือทิ้งจากระบบตะกอนเร่ง (wasted activated sludge)	แบบห้องเดี่ยว	469.21±791.06 mW/m ³ (78.20±131.87mW/m ²)	งานวิจัยนี้
ตะกอนน้ำเสีย (Acivated Sludge)	แบบห้องเดี่ยว	0.032 mW/m ²	(C. T. Wang et al., 2019)
ตะกอนน้ำเสีย (Urban river sediment)	แบบห้องเดี่ยว	86.06 mW/m ³	(Kabutey et al., 2019)
ตะกอนน้ำเสีย (Wetland sediment)	แบบห้องเดี่ยว	373 mW/m ²	(Sun et al. , 2009)
ตะกอนน้ำเสีย (River sediment)	แบบห้องเดี่ยว	98 mW/m ²	(Lin et al. , 2013)
ตะกอนน้ำเสีย (Anaerobic sludge)	แบบห้องเดี่ยว	5.79 W/m ³	(Gao et al. , 2014)
ตะกอนน้ำเสีย (Fermented primary sludge)	แบบห้องเดี่ยว	1.03 W/m ²	(Yang et al. , 2013b)

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อการย่อยกากตะกอนส่วนเกินและการผลิตไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ โดยแบ่งการทดลอง เป็น 2 ช่วง ในช่วงแรกเป็นการศึกษาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการออกแบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์สำหรับย่อยกากตะกอนส่วนเกิน เพื่อให้ได้ค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยการเดินระบบแบบต่อเนื่อง จากนั้นจึงศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อการย่อยกากตะกอนส่วนเกินและการผลิตกำลังไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ โดยสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

5.1.1 ผลการทดลองเพื่อออกแบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ย่อยกากตะกอนส่วนเกินพบว่า ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม เท่ากับ 4 เซนติเมตร โดยให้ค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 174.72 มิลลิวัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร ขนาดของขั้วไฟฟ้าแคโทดและแอโนดที่เหมาะสม เท่ากับ อัตราส่วน 0.75 (แคโทด 4 ตร.ซม : แอโนด 3 ตร.ซม) โดยให้ค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 2612.43 มิลลิวัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร และวัสดุที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้าแคโทดและแอโนดที่เหมาะสม เท่ากับ ผ้ายคาร์บอนกับผ้ายคาร์บอน โดยให้ค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 589.09 มิลลิวัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร และมีประสิทธิภาพการกำจัดกากตะกอน เท่ากับ ร้อยละ 34.10, 83.45 และ 55.88 ตามลำดับ

5.1.2 อุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตไฟฟ้าและกำจัดซีโอดีของเซลล์เชื้อเพลิง จุลินทรีย์ แบบห้องเดี่ยวจากตะกอนเหลือทิ้ง คือ 30 องศาเซลเซียส โดย ณ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์มีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเฉลี่ย และ ค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงสุด เท่ากับ 1979.19 มิลลิแอมแปร์ต่อลูกบาศก์เมตร และ 469.21 มิลลิวัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ และมีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีคิดเป็นร้อยละ 77 ซึ่งเป็นค่าสูงสุดในงานวิจัยนี้

5.1.3 ปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังไฟฟ้าและการกำจัดซีโอดีของเซลล์เชื้อเพลิง จุลินทรีย์แบบห้องเดี่ยวจากตะกอนเหลือทิ้งเป็นปฏิกิริยาแบบลำดับที่ 1 (first order reaction) โดยค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้แปรผันตามปริมาณกากตะกอนส่วนเกินที่ถูกกำจัดในรูปแบบสมการเส้นตรง

5.1.4 เมื่อเปรียบเทียบค่าปริมาณทางไฟฟ้าต่าง ๆ ที่ผลิตได้ จากการเดินระบบเซลล์เชื้อเพลิง จุลินทรีย์ในงานวิจัยนี้แล้วกล่าวได้ว่า ผู้ประกอบการสามารถประยุกต์กระบวนการย่อยสลายกาก ตะกอนเหลือทิ้งให้กลายเป็นเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์เพื่อผลิตไฟฟ้าไปในตัวได้โดยไม่ต้องเติมสารเคมี เร่งปฏิกิริยาหรือติดตั้งเมมเบรน ทั้งนี้ปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้นั้น แม้มิใช่มากเท่าการผลิตไฟฟ้าด้วยวิธี

อื่น แต่ก็ถือว่าเป็นผลพลอยได้จากการกำจัดกากตะกอนเหลือทิ้งซึ่งจะต้องดำเนินการอยู่แล้ว สิ่งนี้อาจส่งผลกระทบต่อทัศนคติของผู้ประกอบการให้มองเห็นการกำจัดกากตะกอนเหลือทิ้งเป็นกระบวนการสร้างกำไรมากกว่าเป็นภาระที่ต้องดำเนินการ

5.2 ข้อเสนอแนะ

ควรมีการศึกษาของปัจจัยอื่น ๆ เพิ่มเติม เพื่อใช้เป็นแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้องเดี่ยว ดังนี้

1. การเติมสารเคมีที่ใช้เป็นเมดิเอเตอร์ในการช่วยส่งผ่านอิเล็กตรอนไปยังขั้วไฟฟ้า
2. การต่อชุดเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์เป็นแบบอนุกรม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการผลิตกระแสไฟฟ้า



บรรณานุกรม



กรมควบคุมมลพิษ. (2546). *สรุปเกณฑ์แนะนำการออกแบบระบบรวบรวมน้ำเสียและโรงปรับปรุงคุณภาพน้ำของชุมชน* (พิมพ์ครั้งที่ ๑). กรุงเทพฯ: สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย.

กรมควบคุมมลพิษ. (2558). ระบบบำบัดน้ำเสีย. Retrieved from http://www.pcd.go.th/info_serv/water_wt.html#s1

กันยรัตน์ โทละสุต, ประสาท โพธิ์นิ่มแดง, ทวีทย์ จันทร์สวด, กิตติมา งามสาย, ส. ว. (2550). การผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสียโดยใช้เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้องเดียว. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 17*.

กันยรัตน์ โทละสุต. (2554). วิวัฒนาการ การผลิตไฟฟ้าจากน้ำเสีย สู่อุตสาหกรรมแล้วได้ไฟฟ้า. *วารสารเทคนิค Energy Saving*, 80–81.

ชลทิตา สุขเกษม. (2554). เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ : เทคโนโลยีนวัตกรรม “แปลงน้ำเสียเป็นไฟฟ้า”. *วิศวกรรมสาร มข*, 3(38), 347–362.

บุญชัย วิจิตรเสถียร. (2557). การพัฒนากระบวนการย่อยแบบไม่ใช้อากาศ เพื่อบำบัดตะกอนส่วนเกินจากระบบบำบัดน้ำเสีย. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา.

พลกฤษณ์ คุ่มกล้า. (2557). การผลิตก๊าซชีวภาพจากฟางข้าว. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร, กรุงเทพฯ.

วีระวุฒิ ทองบริบูรณ์. (2550). การบำบัดตะกอนจากระบบตะกอนเร่ง และตะกอนสเปนท์เกรนของโรงงานผลิตเบียร์ โดยดึงหมักไร้อากาศและการใช้ตะกอนย่อยเพื่อเป็นวัสดุปรับปรุงดิน (มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์). <https://doi.org/10.14457/KU.the.2007.47>

สุพจน์ เดชผล. (2546). การศึกษาศักยภาพและประสิทธิภาพของเชื้อเพลิงอัดแท่ง จากกากตะกอนน้ำเสียโรงงานน้ำตาลผสมกับขานอ้อย. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ.

APHA. (1999). *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater*. In L. S. Clesceri, A. E. Greenbaerg, & A. D. Eaton (Eds.), *American Public Health Association, American Water Works Association and Water Environmental*

Federation: Washington, DC, USA (Vol. 552). [https://doi.org/ISBN 9780875532356](https://doi.org/ISBN%209780875532356)

Appels, L., Baeyens, J., Degrève, J., & Dewil, R. (2008, December). Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 34, pp. 755–781.

<https://doi.org/10.1016/j.pecs.2008.06.002>

Baicea, C. M., Luntraru, V. I., Vaireanu, D. I., Vasile, E., & Trusca, R. (2013). Composite membranes with poly(ether ether ketone) as support and polyaniline like structure, with potential applications in fuel cells. *Central European Journal of Chemistry*, 11(3), 438–445. <https://doi.org/10.2478/s11532-012-0175-2>

Choudhury, P., Prasad Uday, U. S., Bandyopadhyay, T. K., Ray, R. N., & Bhunia, B. (2017). Performance improvement of microbial fuel cell (MFC) using suitable electrode and Bioengineered organisms: A review. *Bioengineered*.

<https://doi.org/10.1080/21655979.2016.1267883>

Gao, C., Wang, A., Wu, W. M., Yin, Y., & Zhao, Y. G. (2014). Enrichment of anodic biofilm inoculated with anaerobic or aerobic sludge in single chambered air-cathode microbial fuel cells. *Bioresource Technology*, 167.

<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.05.120>

Gebreeyessus, G. (2016). Thermophilic versus Mesophilic Anaerobic Digestion of Sewage Sludge: A Comparative Review. In *Bioengineering* (Vol. 3).

<https://doi.org/10.3390/bioengineering3020015>

Gude, V. G. (2016). Wastewater Treatment in Microbial Fuel Cells – An Overview. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 122).

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.022>

International Water association. (2014). *Activated Sludge - 100 Years and Counting*.

Retrieved from <http://www.iwa100as.org/history.php>

- Jia, Y., Feng, H., Shen, D., Zhou, Y., Chen, T., Wang, M., ... Zheng, S. (2018). High-performance microbial fuel cell anodes obtained from sewage sludge mixed with fly ash. *Journal of Hazardous Materials*, *354*, 27–32.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.04.008>
- Jiang, J., Zhao, Q., Wei, L., Wang, K., & Lee, D. J. (2011). Degradation and characteristic changes of organic matter in sewage sludge using microbial fuel cell with ultrasound pretreatment. *Bioresource Technology*, *102*(1), 272–277.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.04.066>
- JR, P., TA, S., & Thordarson, P. (2007). Photoinduced reduction of catalytically and biologically active Ru(II)bisterpyridine-cytochrome c bioconjugates. *Chemical Communications (Cambridge, England)*, (19), 1899–1901.
- Kabutey, F. T., Ding, J., Zhao, Q., Antwi, P., Quashie, F. K., Tankapa, V., & Zhang, W. (2019). Pollutant removal and bioelectricity generation from urban river sediment using a macrophyte cathode sediment microbial fuel cell (mSMFC). *Bioelectrochemistry*, *128*. <https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2019.01.007>
- Karthikeyan, R., Selvam, A., Cheng, K. Y., & Wong, J. W. C. (2016). Influence of ionic conductivity in bioelectricity production from saline domestic sewage sludge in microbial fuel cells. *Bioresource Technology*, *200*, 845–852.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.10.101>
- Larrosa-Guerrero, A., Scott, K., Head, I. M., Mateo, F., Ginesta, A., & Godinez, C. (2010). Effect of temperature on the performance of microbial fuel cells. *Fuel*, *89*(12), 3985–3994. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2010.06.025>
- Li, W., Zhang, S., Chen, G., & Hua, Y. (2014). Simultaneous electricity generation and

- pollutant removal in microbial fuel cell with denitrifying biocathode over nitrite. *Applied Energy*, 126, 136–141. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.04.015>
- Lin, H., Wu, X., Miller, C., & Zhu, J. (2013). Improved performance of microbial fuel cells enriched with natural microbial inocula and treated by electrical current. *Biomass and Bioenergy*, 54. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.03.030>
- Logan, B. E., Hamelers, B., Rozendal, R., Schröder, U., Keller, J., Freguia, S., ... Rabaey, K. (2006). Microbial Fuel Cells: Methodology and Technology[†]. *Environmental Science & Technology*, 40(17), 5181–5192. <https://doi.org/10.1021/es0605016>
- Metcalf, E. (2004). *Waswater Engineering Treatment and Reuse* (Internatio). Singapore: McGraw-Hill.
- Moon, H., Chang, I. S., & Kim, B. H. (2006). Continuous electricity production from artificial wastewater using a mediator-less microbial fuel cell. *Bioresource Technology*, 97(4), 621–627. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.03.027>
- Moqsud, M. A., Omine, K., Yasufuku, N., Hyodo, M., & Nakata, Y. (2013). Microbial fuel cell (MFC) for bioelectricity generation from organic wastes. *Waste Management*, 33(11), 2465–2469. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.07.026>
- Noguerol-Arias, J., Rodriguez-Abalde, A., Romero-Merino, E., & Flotats, X. (2012). Determination of chemical oxygen demand in heterogeneous solid or semisolid samples using a novel method combining solid dilutions as a preparation step followed by optimized closed reflux and colorimetric measurement. *Analytical Chemistry*, 84(13). <https://doi.org/10.1021/ac3003566>
- Oh, S., Min, B., & Logan, B. E. (2004). Cathode performance as a factor in electricity generation in microbial fuel cells. *Environmental Science and Technology*, 38(18), 4900–4904. <https://doi.org/10.1021/es049422p>

- Papaharalabos, G., Greenman, J., Melhuish, C., & Ieropoulos, I. (2015). A novel small scale Microbial Fuel Cell design for increased electricity generation and waste water treatment. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(11).
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.01.117>
- Park, Y., Nguyen, V. K., Park, S., Yu, J., & Lee, T. (2018). Effects of anode spacing and flow rate on energy recovery of flat-panel air-cathode microbial fuel cells using domestic wastewater. *Bioresour. Technol.*, 258, 57–63.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.02.097>
- Patel, R., & Deb, D. (2018). Adaptive Backstepping Control of Single Chamber Microbial Fuel Cell. *IFAC-PapersOnLine*, 51(1), 319–322.
<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.05.037>
- Sun, J., Hu, Y., Bi, Z., & Cao, Y. (2009). Improved performance of air-cathode single-chamber microbial fuel cell for wastewater treatment using microfiltration membranes and multiple sludge inoculation. *Journal of Power Sources*, 187(2).
<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2008.11.022>
- Tee, P. F., Abdullah, M. O., Tan, I. A. W., Amin, M. A. M., Nolasco-Hipolito, C., & Bujang, K. (2018). Bio-energy generation in an affordable, single-chamber microbial fuel cell integrated with adsorption hybrid system: effects of temperature and comparison study. *Environmental Technology (United Kingdom)*.
<https://doi.org/10.1080/09593330.2017.1320433>
- Ueoka, N., Sese, N., Sue, M., Kouzuma, A., & Watanabe, K. (2016). Sizes of Anode and Cathode Affect Electricity Generation in Rice Paddy-Field Microbial Fuel Cells. *Journal of Sustainable Bioenergy Systems*, 06(01).
<https://doi.org/10.4236/jsbs.2016.61002>

- Wang, C. T., Sangeetha, T., Yan, W. M., Chong, W. T., Saw, L. H., Zhao, F., ... Wang, C. H. (2019). Application of interface material and effects of oxygen gradient on the performance of single-chamber sediment microbial fuel cells (SSMFCs). *Journal of Environmental Sciences (China)*, 75. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2018.03.013>
- Wang, Jie, Zheng, Y., Jia, H., & Zhang, H. (2014). Bioelectricity generation in an integrated system combining microbial fuel cell and tubular membrane reactor: Effects of operation parameters performing a microbial fuel cell-based biosensor for tubular membrane bioreactor. *Bioresource Technology*, 170, 483–490. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.08.033>
- Wang, Junfeng, Song, X., Wang, Y., Bai, J., Bai, H., Yan, D., ... Dong, G. (2017). Bioresource Technology Bioelectricity generation , contaminant removal and bacterial community distribution as a ff ected by substrate material size and aquatic macrophyte in constructed wetland-microbial fuel cell. *Bioresource Technology*, 245(August), 372–378. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.08.191>
- Wei, L., Han, H., & Shen, J. (2013). Effects of temperature and ferrous sulfate concentrations on the performance of microbial fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(25), 11110–11116. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2013.01.019>
- Xiao, B., Han, Y., Liu, X., & Liu, J. (2014). Relationship of methane and electricity production in two-chamber microbial fuel cell using sewage sludge as substrate. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(29), 16419–16425. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.08.024>
- Yang, F., Ren, L., Pu, Y., & Logan, B. E. (2013a). Electricity generation from fermented primary sludge using single-chamber air-cathode microbial fuel cells. *Bioresource*

Technology, 128, 784–787. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.10.021>

Yang, F., Ren, L., Pu, Y., & Logan, B. E. (2013b). Electricity generation from fermented primary sludge using single-chamber air-cathode microbial fuel cells. *Bioresource Technology*, 128. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.10.021>

Ye, D., Yang, Y., Li, J., Zhu, X., Liao, Q., Deng, B., & Chen, R. (2013). Performance of a microfluidic microbial fuel cell based on graphite electrodes. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(35), 15710–15715. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2013.05.034>

Ye, T. ran, Song, N., Chen, M., Yan, Z. sheng, & Jiang, H. L. (2016). No enhancement of cyanobacterial bloom biomass decomposition by sediment microbial fuel cell (SMFC) at different temperatures. *Environmental Pollution*, 218, 59–65. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.07.054>

Zhang, G., Zhao, Q., Jiao, Y., Wang, K., Lee, D. J., & Ren, N. (2012). Efficient electricity generation from sewage sludge using biocathode microbial fuel cell. *Water Research*, 46(1), 43–52. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.10.036>

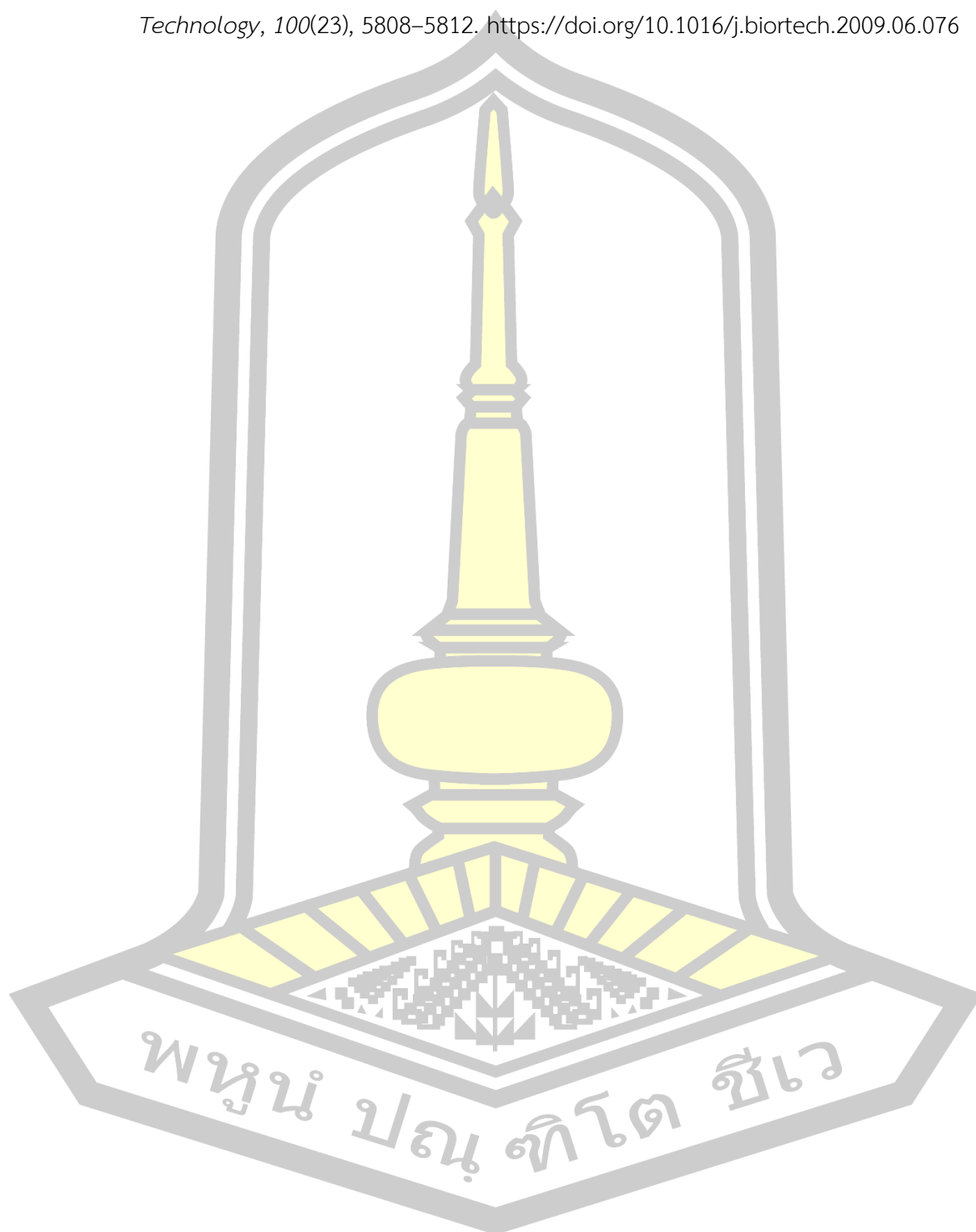
Zhang, P., Liu, X.-H., Li, K.-X., & Song, Z.-Q. (2015). Optimization of Fabrication Parameters to Enhance the Performance of Activated Carbon Air-Cathode. *Journal of The Electrochemical Society*, 162(12). <https://doi.org/10.1149/2.0501512jes>

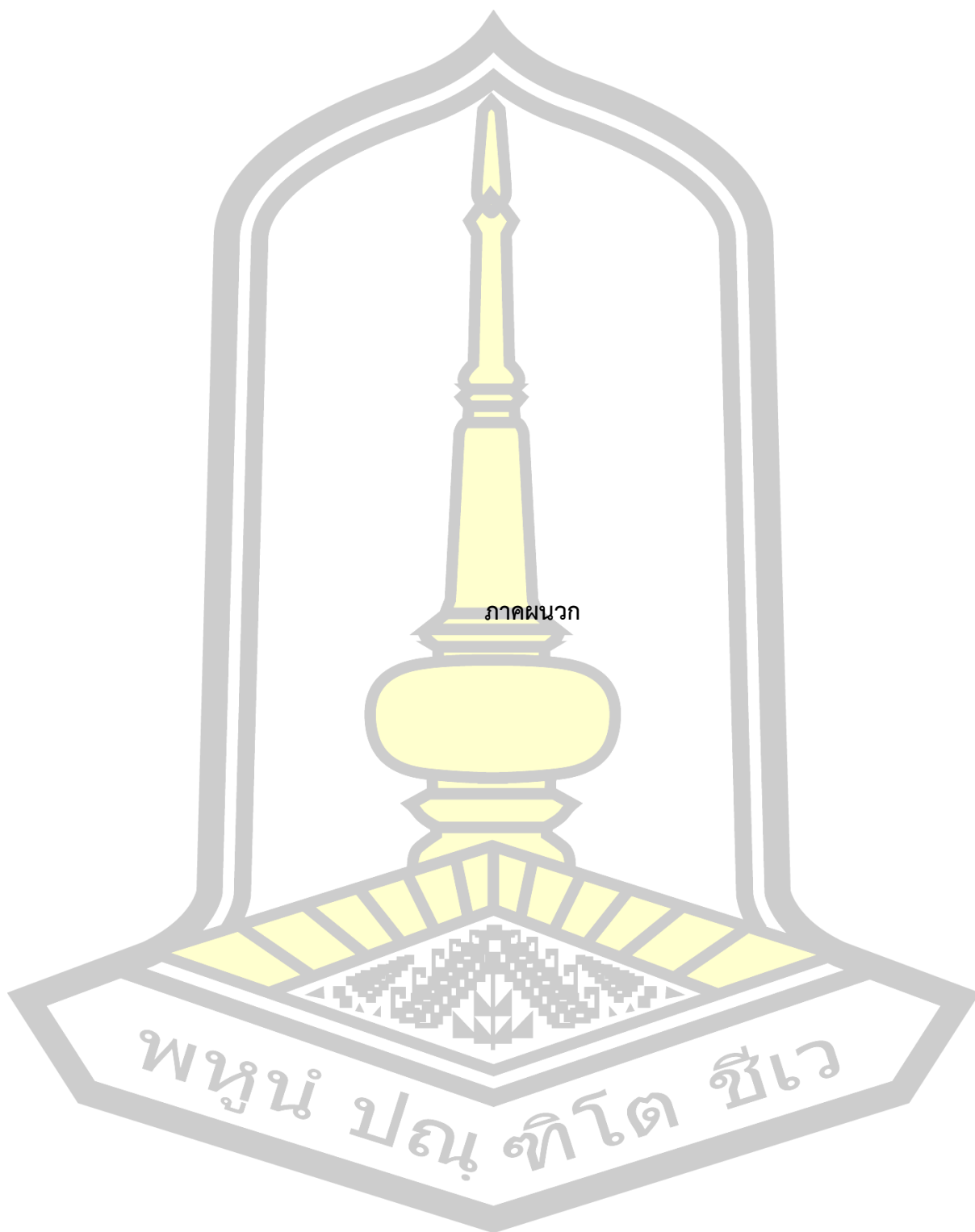
Zhang, X., Miao, X., Li, J., & Li, Z. (2019). Evaluation of electricity production from Fenton oxidation pretreated sludge using a two-chamber microbial fuel cell. *Chemical Engineering Journal*, 361, 599–608. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2018.12.117>

Zhao, Q., Zhang, J., Jiang, J., Lee, D.-J., & Zhang, G. (2009). Electricity generation from

bio-treatment of sewage sludge with microbial fuel cell. *Bioresource*

Technology, 100(23), 5808–5812. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.06.076>





ภาคผนวก

พูนํ ปณํ ทิโต ชีเว

การทดลองที่ 1 เป็นการศึกษาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการออกแบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์สำหรับย่อยกากตะกอนส่วนเกิน

การทดลองที่ 1.1 ผลการทดลองระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า

ตารางที่ 1 ผลการทดลองระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 4 เซนติเมตร

Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ³)	Power Density (mW/m ³)	Power Density (mW/m ²)
1	112.98	0.113	0.013	2259.68	255.31	31.91
2	113.20	0.113	0.013	2264.05	256.30	32.04
3	114.15	0.114	0.013	2283.06	260.62	32.58
4	115.43	0.115	0.013	2308.61	266.48	33.31
5	116.59	0.117	0.014	2331.84	271.87	33.98
6	117.21	0.117	0.014	2344.23	274.77	34.35
7	116.94	0.117	0.014	2338.86	273.51	34.19
8	117.12	0.117	0.014	2342.43	274.35	34.29
9	116.98	0.117	0.014	2339.52	273.67	34.21
10	116.66	0.117	0.014	2333.13	272.18	34.02
11	116.88	0.117	0.014	2337.70	273.24	34.16
12	119.18	0.119	0.014	2383.59	284.07	35.51
13	120.05	0.120	0.014	2401.04	288.25	36.03
14	120.44	0.120	0.015	2408.83	290.12	36.27
15	120.81	0.121	0.015	2416.25	291.91	36.49
16	121.60	0.122	0.015	2431.90	295.71	36.96
17	121.76	0.122	0.015	2435.20	296.51	37.06
18	122.06	0.122	0.015	2441.21	297.97	37.25
19	121.90	0.122	0.015	2437.95	297.18	37.15
20	121.56	0.122	0.015	2431.22	295.54	36.94
21	120.03	0.120	0.014	2400.62	288.15	36.02
22	117.82	0.118	0.014	2356.45	277.64	34.71
23	116.75	0.117	0.014	2335.02	272.61	34.08
24	116.00	0.116	0.013	2319.98	269.12	33.64
25	103.21	0.103	0.011	2064.16	213.04	26.63
26	101.46	0.101	0.010	2029.27	205.90	25.74
27	101.95	0.102	0.010	2038.94	207.86	25.98
28	102.02	0.102	0.010	2040.45	208.17	26.02
29	101.32	0.101	0.010	2026.42	205.32	25.66
30	99.18	0.099	0.010	1983.57	196.73	24.59

Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power Density (mW/m ³)	Power Density (mW/m ²)
31	97.57	0.098	0.010	1951.50	190.42	23.80
32	96.57	0.097	0.009	1931.50	186.53	23.32
33	95.81	0.096	0.009	1916.12	183.58	22.95
34	93.94	0.094	0.009	1878.72	176.48	22.06
35	92.52	0.093	0.009	1850.39	171.20	21.40
36	91.37	0.091	0.008	1827.31	166.95	20.87
37	88.35	0.088	0.008	1767.06	156.12	19.52
38	87.09	0.087	0.008	1741.77	151.69	18.96
39	85.91	0.086	0.007	1718.17	147.61	18.45
40	85.52	0.086	0.007	1710.47	146.29	18.29
41	85.92	0.086	0.007	1718.30	147.63	18.45
42	86.09	0.086	0.007	1721.79	148.23	18.53
43	86.69	0.087	0.008	1733.74	150.29	18.79
44	86.18	0.086	0.007	1723.66	148.55	18.57
45	87.38	0.087	0.008	1747.61	152.71	19.09
46	88.26	0.088	0.008	1765.17	155.79	19.47
47	91.50	0.092	0.008	1830.01	167.45	20.93
48	91.89	0.092	0.008	1837.72	168.86	21.11
49	93.38	0.093	0.009	1867.52	174.38	21.80
50	90.76	0.091	0.008	1815.15	164.74	20.59
51	90.15	0.090	0.008	1802.94	162.53	20.32
52	89.27	0.089	0.008	1785.45	159.39	19.92
53	88.06	0.088	0.008	1761.19	155.09	19.39
54	87.32	0.087	0.008	1746.37	152.49	19.06
55	86.87	0.087	0.008	1737.47	150.94	18.87
56	85.75	0.086	0.007	1715.09	147.08	18.38
57	83.67	0.084	0.007	1673.41	140.01	17.50
58	82.08	0.082	0.007	1641.58	134.74	16.84
59	79.79	0.080	0.006	1595.71	127.31	15.91
60	77.53	0.078	0.006	1550.52	120.21	15.03
61	75.66	0.076	0.006	1513.22	114.49	14.31
62	73.42	0.073	0.005	1468.49	107.82	13.48
63	72.76	0.073	0.005	1455.16	105.87	13.23
64	72.95	0.073	0.005	1459.01	106.44	13.30
65	74.37	0.074	0.006	1487.48	110.63	13.83
66	76.80	0.077	0.006	1536.01	117.97	14.75
67	80.16	0.080	0.006	1603.21	128.51	16.06

68	83.68	0.084	0.007	1673.61	140.05	17.51
69	87.81	0.088	0.008	1756.27	154.22	19.28
70	92.18	0.092	0.008	1843.64	169.95	21.24
71	93.92	0.094	0.009	1878.50	176.44	22.05
72	93.38	0.093	0.009	1867.52	174.38	21.80
73	90.76	0.091	0.008	1815.15	164.74	20.59
74	90.15	0.090	0.008	1802.94	162.53	20.32
75	89.27	0.089	0.008	1785.45	159.39	19.92
76	88.06	0.088	0.008	1761.19	155.09	19.39
77	87.32	0.087	0.008	1746.37	152.49	19.06
78	86.87	0.087	0.008	1737.47	150.94	18.87
79	85.75	0.086	0.007	1715.09	147.08	18.38
80	83.67	0.084	0.007	1673.41	140.01	17.50
81	82.08	0.082	0.007	1641.58	134.74	16.84
82	79.79	0.080	0.006	1595.71	127.31	15.91
83	77.53	0.078	0.006	1550.52	120.21	15.03
84	75.66	0.076	0.006	1513.22	114.49	14.31
85	73.42	0.073	0.005	1468.49	107.82	13.48
86	72.76	0.073	0.005	1455.16	105.87	13.23
87	72.95	0.073	0.005	1459.01	106.44	13.30
88	74.37	0.074	0.006	1487.48	110.63	13.83
89	76.80	0.077	0.006	1536.01	117.97	14.75
90	80.16	0.080	0.006	1603.21	128.51	16.06
91	83.68	0.084	0.007	1673.61	140.05	17.51
92	87.81	0.088	0.008	1756.27	154.22	19.28
93	92.18	0.092	0.008	1843.64	169.95	21.24
94	93.92	0.094	0.009	1878.50	176.44	22.05
95	92.76	0.093	0.009	1855.18	172.09	21.51
96	92.62	0.093	0.009	1852.31	171.55	21.44
97	94.14	0.094	0.009	1882.85	177.26	22.16
98	92.48	0.092	0.009	1849.57	171.05	21.38
99	91.36	0.091	0.008	1827.27	166.95	20.87
100	91.73	0.092	0.008	1834.50	168.27	21.03
101	91.39	0.091	0.008	1827.85	167.05	20.88
102	90.67	0.091	0.008	1813.33	164.41	20.55
103	90.26	0.090	0.008	1805.14	162.93	20.37
104	89.66	0.090	0.008	1793.11	160.76	20.10
105	88.59	0.089	0.008	1771.74	156.95	19.62
106	88.85	0.089	0.008	1776.98	157.88	19.74
107	87.88	0.088	0.008	1757.66	154.47	19.31

Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ³)	Power Density (mW/m ³)	Power Density (mW/m ²)
108	86.45	0.086	0.007	1729.06	149.48	18.69
109	84.61	0.085	0.007	1692.28	143.19	17.90
110	83.99	0.084	0.007	1679.80	141.09	17.64
111	83.24	0.083	0.007	1664.81	138.58	17.32
112	76.46	0.076	0.006	1529.21	116.92	14.62
113	70.88	0.071	0.005	1417.65	100.49	12.56
114	74.31	0.074	0.006	1486.22	110.44	13.81
115	72.36	0.072	0.005	1447.17	104.71	13.09
116	75.64	0.076	0.006	1512.86	114.44	14.30
117	67.75	0.068	0.005	1354.99	91.80	11.47
118	66.22	0.066	0.004	1324.38	87.70	10.96
119	76.05	0.076	0.006	1521.01	115.67	14.46
120	73.37	0.073	0.005	1467.37	107.66	13.46

ตารางที่ 2 ผลการทดลองระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 6 เซนติเมตร

Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ³)	Power Density (mW/m ³)	Power Density (mW/m ²)
1	139.35	0.139	0.013	2786.91	257.33	32.17
2	113.01	0.113	0.013	2260.25	255.44	31.93
3	109.97	0.110	0.012	2199.47	241.88	30.24
4	104.67	0.105	0.011	2093.35	219.11	27.39
5	96.78	0.097	0.009	1935.51	187.31	23.41
6	86.84	0.087	0.008	1736.89	150.84	18.85
7	76.96	0.077	0.006	1539.19	118.46	14.81
8	70.66	0.071	0.005	1413.18	99.85	12.48
9	66.43	0.066	0.004	1328.66	88.27	11.03
10	63.34	0.063	0.004	1266.75	80.23	10.03
11	61.24	0.061	0.004	1224.75	75.00	9.38
12	59.69	0.060	0.004	1193.87	71.27	8.91
13	58.57	0.059	0.003	1171.50	68.62	8.58
14	57.68	0.058	0.003	1153.57	66.54	8.32
15	57.06	0.057	0.003	1141.12	65.11	8.14
16	56.79	0.057	0.003	1135.75	64.50	8.06
17	56.44	0.056	0.003	1128.80	63.71	7.96

Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power Density (mW/m ³)	Power Density (mW/m ²)
18	56.27	0.056	0.003	1125.32	63.32	7.91
19	56.02	0.056	0.003	1120.38	62.76	7.85
20	55.77	0.056	0.003	1115.35	62.20	7.78
21	55.08	0.055	0.003	1101.68	60.68	7.59
22	53.98	0.054	0.003	1079.61	58.28	7.28
23	53.26	0.053	0.003	1065.16	56.73	7.09
24	52.83	0.053	0.003	1056.53	55.81	6.98
25	42.56	0.043	0.002	851.12	36.22	4.53
26	41.09	0.041	0.002	821.87	33.77	4.22
27	40.39	0.040	0.002	807.76	32.62	4.08
28	39.53	0.040	0.002	790.53	31.25	3.91
29	38.05	0.038	0.001	761.04	28.96	3.62
30	36.58	0.037	0.001	731.68	26.77	3.35
31	35.28	0.035	0.001	705.65	24.90	3.11
32	34.48	0.034	0.001	689.70	23.78	2.97
33	33.70	0.034	0.001	673.90	22.71	2.84
34	33.00	0.033	0.001	660.08	21.79	2.72
35	32.14	0.032	0.001	642.89	20.67	2.58
36	31.49	0.031	0.001	629.85	19.84	2.48
37	31.80	0.032	0.001	635.96	20.22	2.53
38	32.32	0.032	0.001	646.47	20.90	2.61
39	32.80	0.033	0.001	655.97	21.51	2.69
40	33.29	0.033	0.001	665.75	22.16	2.77
41	33.18	0.033	0.001	663.56	22.02	2.75
42	32.99	0.033	0.001	659.85	21.77	2.72
43	33.22	0.033	0.001	664.44	22.07	2.76
44	33.52	0.034	0.001	670.40	22.47	2.81
45	33.64	0.034	0.001	672.87	22.64	2.83
46	32.87	0.033	0.001	657.36	21.61	2.70
47	34.02	0.034	0.001	680.37	23.15	2.89
48	33.81	0.034	0.001	676.24	22.87	2.86
49	33.58	0.034	0.001	671.69	22.56	2.82
50	32.70	0.033	0.001	653.99	21.39	2.67
51	31.35	0.031	0.001	626.92	19.65	2.46
52	30.27	0.030	0.001	605.35	18.32	2.29
53	29.73	0.030	0.001	594.67	17.68	2.21
54	29.45	0.029	0.001	589.00	17.35	2.17

Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power Density (mW/m ³)	Power Density (mW/m ²)
55	28.91	0.029	0.001	578.24	16.72	2.09
56	26.71	0.027	0.001	534.19	14.27	1.78
57	24.74	0.025	0.001	494.77	12.24	1.53
58	23.67	0.024	0.001	473.49	11.21	1.40
59	22.81	0.023	0.001	456.20	10.41	1.30
60	22.14	0.022	0.000	442.76	9.80	1.23
61	21.60	0.022	0.000	432.06	9.33	1.17
62	21.04	0.021	0.000	420.83	8.86	1.11
63	20.48	0.020	0.000	409.64	8.39	1.05
64	20.02	0.020	0.000	400.39	8.02	1.00
65	20.39	0.020	0.000	407.82	8.32	1.04
66	20.94	0.021	0.000	418.86	8.77	1.10
67	21.64	0.022	0.000	432.81	9.37	1.17
68	22.63	0.023	0.001	452.67	10.25	1.28
69	23.47	0.023	0.001	469.34	11.01	1.38
70	23.78	0.024	0.001	475.67	11.31	1.41
71	23.66	0.024	0.001	473.29	11.20	1.40
72	33.58	0.034	0.001	671.69	22.56	2.82
73	32.70	0.033	0.001	653.99	21.39	2.67
74	31.35	0.031	0.001	626.92	19.65	2.46
75	30.27	0.030	0.001	605.35	18.32	2.29
76	29.73	0.030	0.001	594.67	17.68	2.21
77	29.45	0.029	0.001	589.00	17.35	2.17
78	28.91	0.029	0.001	578.24	16.72	2.09
79	26.71	0.027	0.001	534.19	14.27	1.78
80	24.74	0.025	0.001	494.77	12.24	1.53
81	23.67	0.024	0.001	473.49	11.21	1.40
82	22.81	0.023	0.001	456.20	10.41	1.30
83	22.14	0.022	0.000	442.76	9.80	1.23
84	21.60	0.022	0.000	432.06	9.33	1.17
85	21.04	0.021	0.000	420.83	8.86	1.11
86	20.48	0.020	0.000	409.64	8.39	1.05
87	20.02	0.020	0.000	400.39	8.02	1.00
88	20.39	0.020	0.000	407.82	8.32	1.04
89	20.94	0.021	0.000	418.86	8.77	1.10
90	21.64	0.022	0.000	432.81	9.37	1.17
91	22.63	0.023	0.001	452.67	10.25	1.28

Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power Density (mW/m ³)	Power Density (mW/m ²)
92	23.47	0.023	0.001	469.34	11.01	1.38
93	23.78	0.024	0.001	475.67	11.31	1.41
94	23.66	0.024	0.001	473.29	11.20	1.40
95	23.56	0.024	0.001	471.12	11.10	1.39
96	23.29	0.023	0.001	465.77	10.85	1.36
97	16.96	0.017	0.000	339.13	5.75	0.72
98	16.50	0.017	0.000	330.03	5.45	0.68
99	16.17	0.016	0.000	323.32	5.23	0.65
100	15.98	0.016	0.000	319.69	5.11	0.64
101	15.83	0.016	0.000	316.51	5.01	0.63
102	15.57	0.016	0.000	311.48	4.85	0.61
103	15.36	0.015	0.000	307.20	4.72	0.59
104	15.03	0.015	0.000	300.62	4.52	0.56
105	14.78	0.015	0.000	295.57	4.37	0.55
106	14.55	0.015	0.000	291.03	4.23	0.53
107	14.28	0.014	0.000	285.50	4.08	0.51
108	13.96	0.014	0.000	279.28	3.90	0.49
109	13.76	0.014	0.000	275.20	3.79	0.47
110	13.48	0.013	0.000	269.62	3.63	0.45
111	13.22	0.013	0.000	264.42	3.50	0.44
112	12.98	0.013	0.000	259.58	3.37	0.42
113	12.83	0.013	0.000	256.65	3.29	0.41
114	12.73	0.013	0.000	254.68	3.24	0.41
115	12.56	0.013	0.000	251.13	3.15	0.39
116	12.45	0.012	0.000	249.05	3.10	0.39
117	12.46	0.012	0.000	249.24	3.11	0.39
118	12.56	0.013	0.000	251.12	3.15	0.39
119	12.72	0.013	0.000	254.38	3.24	0.40
120	12.89	0.013	0.000	257.87	3.32	0.42

ตารางที่ 3 ผลการทดลองระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 8 เซนติเมตร

Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power Density (mW/m ³)	Power Density (mW/m ²)
1	84.48	0.084	0.007	1689.58	142.73	17.84
2	85.92	0.086	0.007	1718.37	147.64	18.45
3	89.10	0.089	0.008	1781.95	158.77	19.85
4	88.60	0.089	0.008	1771.97	156.99	19.62
5	88.77	0.089	0.008	1775.48	157.62	19.70
6	88.96	0.089	0.008	1779.17	158.27	19.78
7	88.30	0.088	0.008	1765.93	155.93	19.49
8	87.77	0.088	0.008	1755.49	154.09	19.26
9	86.87	0.087	0.008	1737.31	150.91	18.86
10	85.87	0.086	0.007	1717.32	147.46	18.43
11	85.32	0.085	0.007	1706.48	145.60	18.20
12	84.89	0.085	0.007	1697.89	144.14	18.02
13	85.27	0.085	0.007	1705.43	145.42	18.18
14	85.31	0.085	0.007	1706.14	145.55	18.19
15	85.93	0.086	0.007	1718.58	147.68	18.46
16	86.79	0.087	0.008	1735.87	150.66	18.83
17	85.46	0.085	0.007	1709.29	146.08	18.26
18	85.64	0.086	0.007	1712.87	146.70	18.34
19	85.73	0.086	0.007	1714.68	147.01	18.38
20	85.35	0.085	0.007	1707.05	145.70	18.21
21	84.31	0.084	0.007	1686.18	142.16	17.77
22	82.86	0.083	0.007	1657.12	137.30	17.16
23	81.91	0.082	0.007	1638.16	134.18	16.77
24	81.39	0.081	0.007	1627.79	132.49	16.56
25	79.60	0.080	0.006	1591.97	126.72	15.84
26	78.75	0.079	0.006	1574.95	124.02	15.50
27	79.24	0.079	0.006	1584.84	125.59	15.70
28	79.98	0.080	0.006	1599.64	127.94	15.99
29	80.13	0.080	0.006	1602.60	128.42	16.05
30	79.72	0.080	0.006	1594.32	127.09	15.89
31	79.56	0.080	0.006	1591.25	126.60	15.83
32	79.31	0.079	0.006	1586.18	125.80	15.72
33	78.85	0.079	0.006	1576.96	124.34	15.54
34	78.29	0.078	0.006	1565.74	122.58	15.32
35	77.68	0.078	0.006	1553.54	120.67	15.08

Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power Density (mW/m ³)	Power Density (mW/m ²)
36	76.97	0.077	0.006	1539.34	118.48	14.81
37	76.41	0.076	0.006	1528.30	116.78	14.60
38	75.95	0.076	0.006	1518.93	115.36	14.42
39	76.13	0.076	0.006	1522.69	115.93	14.49
40	77.04	0.077	0.006	1540.82	118.71	14.84
41	77.68	0.078	0.006	1553.64	120.69	15.09
42	77.86	0.078	0.006	1557.19	121.24	15.16
43	78.31	0.078	0.006	1566.19	122.65	15.33
44	78.77	0.079	0.006	1575.47	124.11	15.51
45	78.93	0.079	0.006	1578.58	124.60	15.57
46	77.63	0.078	0.006	1552.57	120.52	15.07
47	79.22	0.079	0.006	1584.50	125.53	15.69
48	79.28	0.079	0.006	1585.56	125.70	15.71
49	79.44	0.079	0.006	1588.84	126.22	15.78
50	79.25	0.079	0.006	1585.04	125.62	15.70
51	78.48	0.078	0.006	1569.58	123.18	15.40
52	78.01	0.078	0.006	1560.13	121.70	15.21
53	77.53	0.078	0.006	1550.66	120.23	15.03
54	76.87	0.077	0.006	1537.32	118.17	14.77
55	76.40	0.076	0.006	1528.00	116.74	14.59
56	75.35	0.075	0.006	1507.01	113.55	14.19
57	74.61	0.075	0.006	1492.29	111.35	13.92
58	74.49	0.074	0.006	1489.72	110.96	13.87
59	73.46	0.073	0.005	1469.26	107.94	13.49
60	73.15	0.073	0.005	1463.04	107.02	13.38
61	72.76	0.073	0.005	1455.25	105.89	13.24
62	72.04	0.072	0.005	1440.85	103.80	12.98
63	71.51	0.072	0.005	1430.13	102.26	12.78
64	70.54	0.071	0.005	1410.86	99.53	12.44
65	70.94	0.071	0.005	1418.75	100.64	12.58
66	71.96	0.072	0.005	1439.18	103.56	12.95
67	72.82	0.073	0.005	1456.48	106.07	13.26
68	73.35	0.073	0.005	1467.00	107.61	13.45
69	74.02	0.074	0.005	1480.33	109.57	13.70
70	73.73	0.074	0.005	1474.50	108.71	13.59
71	72.87	0.073	0.005	1457.43	106.21	13.28
72	79.44	0.079	0.006	1588.84	126.22	15.78

Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power Density (mW/m ³)	Power Density (mW/m ²)
73	79.25	0.079	0.006	1585.04	125.62	15.70
74	78.48	0.078	0.006	1569.58	123.18	15.40
75	78.01	0.078	0.006	1560.13	121.70	15.21
76	77.53	0.078	0.006	1550.66	120.23	15.03
77	76.87	0.077	0.006	1537.32	118.17	14.77
78	76.40	0.076	0.006	1528.00	116.74	14.59
79	75.35	0.075	0.006	1507.01	113.55	14.19
80	74.61	0.075	0.006	1492.29	111.35	13.92
81	74.49	0.074	0.006	1489.72	110.96	13.87
82	73.46	0.073	0.005	1469.26	107.94	13.49
83	73.15	0.073	0.005	1463.04	107.02	13.38
84	72.76	0.073	0.005	1455.25	105.89	13.24
85	72.04	0.072	0.005	1440.85	103.80	12.98
86	71.51	0.072	0.005	1430.13	102.26	12.78
87	70.54	0.071	0.005	1410.86	99.53	12.44
88	70.94	0.071	0.005	1418.75	100.64	12.58
89	71.96	0.072	0.005	1439.18	103.56	12.95
90	72.82	0.073	0.005	1456.48	106.07	13.26
91	73.35	0.073	0.005	1467.00	107.61	13.45
92	74.02	0.074	0.005	1480.33	109.57	13.70
93	73.73	0.074	0.005	1474.50	108.71	13.59
94	72.87	0.073	0.005	1457.43	106.21	13.28
95	71.76	0.072	0.005	1435.22	102.99	12.87
96	70.99	0.071	0.005	1419.80	100.79	12.60
97	55.98	0.056	0.003	1119.59	62.67	7.83
98	55.57	0.056	0.003	1111.35	61.76	7.72
99	55.27	0.055	0.003	1105.38	61.09	7.64
100	55.32	0.055	0.003	1106.48	61.21	7.65
101	55.09	0.055	0.003	1101.79	60.70	7.59
102	54.49	0.054	0.003	1089.72	59.37	7.42
103	53.92	0.054	0.003	1078.33	58.14	7.27
104	53.19	0.053	0.003	1063.81	56.58	7.07
105	52.87	0.053	0.003	1057.41	55.91	6.99
106	52.53	0.053	0.003	1050.56	55.18	6.90
107	51.96	0.052	0.003	1039.19	54.00	6.75
108	51.50	0.052	0.003	1030.00	53.05	6.63
109	51.10	0.051	0.003	1022.07	52.23	6.53

Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ³)	Power Density (mW/m ³)	Power Density (mW/m ²)
110	50.68	0.051	0.003	1013.55	51.36	6.42
111	50.15	0.050	0.003	1003.04	50.30	6.29
112	49.64	0.050	0.002	992.83	49.29	6.16
113	49.46	0.049	0.002	989.14	48.92	6.11
114	49.39	0.049	0.002	987.80	48.79	6.10
115	49.03	0.049	0.002	980.64	48.08	6.01
116	48.40	0.048	0.002	967.99	46.85	5.86
117	48.09	0.048	0.002	961.85	46.26	5.78
118	47.83	0.048	0.002	956.53	45.75	5.72
119	47.22	0.047	0.002	944.39	44.59	5.57
120	46.46	0.046	0.002	929.18	43.17	5.40

การทดลองที่ 1.2 ผลการทดลองขนาดของขั้วไฟฟ้า

ตารางที่ 1 ผลการทดลองขนาดของขั้วไฟฟ้า อัตราส่วนขั้วไฟฟ้าแคโทดต่อแอโนด เท่ากับ 1

Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ³)	Power Density (mW/m ³)
1	141.96	0.14	0.020	2839.26	403.07
2	141.61	0.14	0.020	2832.14	401.05
3	141.29	0.14	0.020	2825.88	399.28
4	140.91	0.14	0.020	2818.11	397.09
5	140.43	0.14	0.020	2808.55	394.40
6	140.04	0.14	0.020	2800.90	392.25
7	139.69	0.14	0.020	2793.77	390.26
8	139.27	0.14	0.019	2785.47	387.94
9	138.83	0.14	0.019	2776.68	385.50
10	138.35	0.14	0.019	2767.08	382.84
11	137.93	0.14	0.019	2758.57	380.49
12	137.67	0.14	0.019	2753.35	379.05
13	138.78	0.14	0.019	2775.56	385.19
14	136.87	0.14	0.019	2737.38	374.66
15	136.50	0.14	0.019	2729.92	372.62
16	136.19	0.14	0.019	2723.84	370.97
17	135.90	0.14	0.018	2717.92	369.36
18	135.49	0.14	0.018	2709.90	367.18

Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ³)	Power Density (mW/m ³)
19	135.10	0.14	0.018	2701.96	365.03
20	134.72	0.13	0.018	2694.31	362.96
21	134.24	0.13	0.018	2684.85	360.42
22	133.79	0.13	0.018	2675.80	358.00
23	133.29	0.13	0.018	2665.82	355.33
24	132.80	0.13	0.018	2655.98	352.71
25	132.33	0.13	0.018	2646.63	350.23
26	131.98	0.13	0.017	2639.54	348.36
27	131.64	0.13	0.017	2632.88	346.60
28	131.26	0.13	0.017	2625.29	344.61
29	130.85	0.13	0.017	2617.04	342.44
30	130.43	0.13	0.017	2608.60	340.24
31	129.94	0.13	0.017	2598.73	337.67
32	129.43	0.13	0.017	2588.61	335.04
33	128.92	0.13	0.017	2578.50	332.43
34	128.42	0.13	0.016	2568.42	329.84
35	127.98	0.13	0.016	2559.59	327.58
36	127.56	0.13	0.016	2551.15	325.42
37	127.16	0.13	0.016	2543.25	323.41
38	126.80	0.13	0.016	2535.96	321.55
39	126.46	0.13	0.016	2529.19	319.84
40	126.16	0.13	0.016	2523.23	318.33
41	125.88	0.13	0.016	2517.66	316.93
42	125.66	0.13	0.016	2513.29	315.83
43	125.64	0.13	0.016	2512.86	315.72
44	125.58	0.13	0.016	2511.64	315.42
45	125.49	0.13	0.016	2509.73	314.94
46	125.40	0.13	0.016	2508.00	314.50
47	125.31	0.13	0.016	2506.12	314.03
48	125.18	0.13	0.016	2503.58	313.40
49	125.06	0.13	0.016	2501.18	312.80
50	124.96	0.12	0.016	2499.29	312.32
51	124.87	0.12	0.016	2497.32	311.83
52	124.75	0.12	0.016	2495.03	311.26
53	124.62	0.12	0.016	2492.38	310.60
54	124.49	0.12	0.015	2489.89	309.98
55	124.36	0.12	0.015	2487.25	309.32
56	124.23	0.12	0.015	2484.67	308.68

Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ³)	Power Density (mW/m ³)
57	124.08	0.12	0.015	2481.66	307.93
58	124.07	0.12	0.015	2481.44	307.88
59	124.02	0.12	0.015	2480.44	307.63
60	123.91	0.12	0.015	2478.29	307.10
61	123.78	0.12	0.015	2475.57	306.42
62	123.61	0.12	0.015	2472.30	305.61
63	123.41	0.12	0.015	2468.14	304.58
64	123.19	0.12	0.015	2463.76	303.50
65	122.94	0.12	0.015	2458.70	302.26
66	122.67	0.12	0.015	2453.35	300.95
67	122.42	0.12	0.015	2448.30	299.71
68	122.10	0.12	0.015	2441.90	298.14
69	121.80	0.12	0.015	2436.10	296.73
70	121.46	0.12	0.015	2429.22	295.05
71	121.13	0.12	0.015	2422.57	293.44
72	120.82	0.12	0.015	2416.42	291.95
73	120.54	0.12	0.015	2410.79	290.60
74	120.28	0.12	0.014	2405.68	289.36
75	120.04	0.12	0.014	2400.71	288.17
76	119.78	0.12	0.014	2395.56	286.94
77	119.52	0.12	0.014	2390.32	285.68
78	119.25	0.12	0.014	2385.09	284.43
79	119.00	0.12	0.014	2379.95	283.21
80	118.79	0.12	0.014	2375.73	282.20
81	118.54	0.12	0.014	2370.88	281.05
82	118.30	0.12	0.014	2365.97	279.89
83	118.04	0.12	0.014	2360.77	278.66
84	117.75	0.12	0.014	2355.01	277.30
85	117.46	0.12	0.014	2349.27	275.95
86	116.98	0.12	0.014	2339.54	273.67
87	116.44	0.12	0.014	2328.70	271.14
88	115.48	0.12	0.013	2309.62	266.72
89	114.61	0.11	0.013	2292.30	262.73
90	114.59	0.11	0.013	2291.76	262.61
91	114.66	0.11	0.013	2293.21	262.94
92	114.53	0.11	0.013	2290.58	262.34
93	114.29	0.11	0.013	2285.85	261.26
94	113.97	0.11	0.013	2279.46	259.80

Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power Density (mW/m ²)
95	113.64	0.11	0.013	2272.86	258.30
96	113.33	0.11	0.013	2266.68	256.89
97	113.02	0.11	0.013	2260.32	255.45
98	112.72	0.11	0.013	2254.38	254.11
99	112.45	0.11	0.013	2249.08	252.92
100	112.21	0.11	0.013	2244.15	251.81
101	112.00	0.11	0.013	2239.99	250.88
102	111.85	0.11	0.013	2237.10	250.23
103	111.74	0.11	0.012	2234.85	249.73
104	111.62	0.11	0.012	2232.38	249.18
105	111.51	0.11	0.012	2230.25	248.70
106	111.20	0.11	0.012	2224.04	247.32
107	110.87	0.11	0.012	2217.36	245.83
108	110.69	0.11	0.012	2213.89	245.06
109	110.94	0.11	0.012	2218.73	246.14
110	111.04	0.11	0.012	2220.78	246.59
111	111.09	0.11	0.012	2221.90	246.84
112	111.13	0.11	0.012	2222.55	246.99
113	111.17	0.11	0.012	2223.46	247.19
114	111.19	0.11	0.012	2223.78	247.26
115	111.22	0.11	0.012	2224.35	247.39
116	111.22	0.11	0.012	2224.42	247.40
117	111.86	0.11	0.013	2237.12	250.24
118	101.64	0.10	0.010	2032.83	206.62
119	74.23	0.07	0.006	1484.61	110.20
120	74.23	0.07	0.006	1484.61	110.20
121	33.74	0.03	0.001	674.89	22.77
122	29.74	0.03	0.001	594.79	17.69
123	27.54	0.03	0.001	550.78	15.17
124	26.29	0.03	0.001	525.72	13.82
125	25.47	0.03	0.001	509.44	12.98
126	24.69	0.02	0.001	493.85	12.19
127	23.98	0.02	0.001	479.50	11.50
128	23.32	0.02	0.001	466.38	10.88
129	22.46	0.02	0.001	449.13	10.09
130	21.43	0.02	0.000	428.57	9.18
131	20.71	0.02	0.000	414.22	8.58
132	20.09	0.02	0.000	401.79	8.07

Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power Density (mW/m ²)
133	19.39	0.02	0.000	387.77	7.52
134	18.74	0.02	0.000	374.85	7.03
135	18.33	0.02	0.000	366.60	6.72
136	18.09	0.02	0.000	361.75	6.54
137	17.79	0.02	0.000	355.78	6.33
138	17.48	0.02	0.000	349.53	6.11
139	17.10	0.02	0.000	342.09	5.85
140	16.73	0.02	0.000	334.52	5.60
141	16.55	0.02	0.000	330.93	5.48
142	16.70	0.02	0.000	333.97	5.58
143	17.03	0.02	0.000	340.61	5.80
144	17.17	0.02	0.000	343.48	5.90
145	17.45	0.02	0.000	349.03	6.09
146	17.85	0.02	0.000	357.02	6.37
147	18.21	0.02	0.000	364.10	6.63
148	18.45	0.02	0.000	369.00	6.81
149	18.64	0.02	0.000	372.89	6.95
150	18.80	0.02	0.000	376.02	7.07
151	18.90	0.02	0.000	377.92	7.14
152	18.93	0.02	0.000	378.68	7.17
153	18.91	0.02	0.000	378.27	7.15
154	18.83	0.02	0.000	376.62	7.09
155	18.27	0.02	0.000	365.46	6.68
156	17.70	0.02	0.000	354.05	6.27
157	17.32	0.02	0.000	346.47	6.00
158	17.09	0.02	0.000	341.72	5.84
159	14.52	0.01	0.000	290.39	4.22
160	16.69	0.02	0.000	333.71	5.57
161	16.51	0.02	0.000	330.21	5.45
162	16.31	0.02	0.000	326.14	5.32
163	16.06	0.02	0.000	321.25	5.16
164	15.85	0.02	0.000	316.94	5.02
165	15.56	0.02	0.000	311.24	4.84
166	15.37	0.02	0.000	307.42	4.73
167	15.24	0.02	0.000	304.88	4.65
168	15.12	0.02	0.000	302.34	4.57
169	14.99	0.01	0.000	299.71	4.49
170	14.73	0.01	0.000	294.70	4.34

Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power Density (mW/m ²)
171	14.44	0.01	0.000	288.76	4.17
172	14.23	0.01	0.000	284.53	4.05
173	14.21	0.01	0.000	284.13	4.04
174	14.35	0.01	0.000	287.03	4.12
175	14.60	0.01	0.000	292.08	4.27
176	14.90	0.01	0.000	297.92	4.44
177	15.13	0.02	0.000	302.64	4.58
178	15.37	0.02	0.000	307.30	4.72
179	15.56	0.02	0.000	311.15	4.84
180	15.72	0.02	0.000	314.38	4.94
181	15.85	0.02	0.000	317.07	5.03
182	15.95	0.02	0.000	319.07	5.09
183	16.02	0.02	0.000	320.31	5.13
184	16.10	0.02	0.000	321.97	5.18
185	16.09	0.02	0.000	321.74	5.18
186	16.00	0.02	0.000	320.09	5.12
187	15.89	0.02	0.000	317.70	5.05
188	15.77	0.02	0.000	315.31	4.97
189	15.65	0.02	0.000	312.95	4.90
190	15.54	0.02	0.000	310.87	4.83
191	15.43	0.02	0.000	308.50	4.76
192	15.28	0.02	0.000	305.57	4.67
193	15.13	0.02	0.000	302.59	4.58
194	14.97	0.01	0.000	299.46	4.48
195	14.78	0.01	0.000	295.59	4.37
196	14.59	0.01	0.000	291.79	4.26
197	14.33	0.01	0.000	286.63	4.11
198	14.03	0.01	0.000	280.69	3.94
199	13.77	0.01	0.000	275.43	3.79
200	13.58	0.01	0.000	271.69	3.69
201	13.44	0.01	0.000	268.82	3.61
202	13.25	0.01	0.000	264.98	3.51
203	12.63	0.01	0.000	252.54	3.19
204	12.45	0.01	0.000	249.02	3.10
205	12.49	0.01	0.000	249.76	3.12
206	12.79	0.01	0.000	255.70	3.27
207	13.24	0.01	0.000	264.70	3.50
208	13.55	0.01	0.000	271.08	3.67

Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ³)	Power Density (mW/m ³)
209	13.98	0.01	0.000	279.58	3.91
210	14.11	0.01	0.000	282.28	3.98
211	14.38	0.01	0.000	287.57	4.13
212	14.63	0.01	0.000	292.59	4.28
213	14.88	0.01	0.000	297.60	4.43
214	15.09	0.02	0.000	301.79	4.55
215	15.20	0.02	0.000	304.03	4.62
216	15.28	0.02	0.000	305.51	4.67
217	15.27	0.02	0.000	305.43	4.66
218	15.20	0.02	0.000	303.91	4.62
219	15.09	0.02	0.000	301.74	4.55
220	14.98	0.01	0.000	299.53	4.49
221	14.86	0.01	0.000	297.11	4.41
222	14.71	0.01	0.000	294.17	4.33
223	14.55	0.01	0.000	291.07	4.24
224	14.39	0.01	0.000	287.83	4.14
225	14.21	0.01	0.000	284.13	4.04
226	14.02	0.01	0.000	280.35	3.93
227	13.82	0.01	0.000	276.30	3.82
228	13.58	0.01	0.000	271.50	3.69
229	13.32	0.01	0.000	266.30	3.55
230	13.09	0.01	0.000	261.81	3.43
231	12.82	0.01	0.000	256.45	3.29
232	12.55	0.01	0.000	251.06	3.15
233	12.29	0.01	0.000	245.81	3.02
234	12.09	0.01	0.000	241.80	2.92
235	11.95	0.01	0.000	239.10	2.86
236	11.88	0.01	0.000	237.60	2.82
237	11.90	0.01	0.000	238.07	2.83
238	12.04	0.01	0.000	240.88	2.90
239	12.18	0.01	0.000	243.66	2.97
240	12.18	0.01	0.000	243.66	2.97

ตารางที่ 2 ผลการทดลองขนาดของขั้วไฟฟ้า อัตราส่วนขั้วไฟฟ้าแคโทดต่อแอโนด เท่ากับ 0.25

Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power Density (mW/m ²)
1	401.79	0.40	0.161	8035.78	3228.69
2	400.97	0.40	0.161	8019.36	3215.51
3	400.32	0.40	0.160	8006.32	3205.06
4	399.43	0.40	0.160	7988.66	3190.93
5	398.17	0.40	0.159	7963.30	3170.71
6	395.97	0.40	0.157	7919.44	3135.88
7	393.80	0.39	0.155	7876.05	3101.61
8	391.79	0.39	0.154	7835.85	3070.03
9	390.07	0.39	0.152	7801.39	3043.08
10	388.02	0.39	0.151	7760.43	3011.21
11	386.01	0.39	0.149	7720.26	2980.12
12	383.58	0.38	0.147	7671.57	2942.65
13	389.64	0.39	0.152	7792.79	3036.38
14	378.03	0.38	0.143	7560.68	2858.19
15	374.80	0.37	0.140	7495.95	2809.46
16	371.77	0.37	0.138	7435.34	2764.21
17	369.16	0.37	0.136	7383.28	2725.64
18	366.99	0.37	0.135	7339.76	2693.61
19	364.94	0.36	0.133	7298.78	2663.61
20	362.77	0.36	0.132	7255.47	2632.09
21	360.88	0.36	0.130	7217.64	2604.72
22	359.05	0.36	0.129	7181.06	2578.38
23	357.18	0.36	0.128	7143.65	2551.59
24	355.31	0.36	0.126	7106.26	2524.95
25	353.44	0.35	0.125	7068.80	2498.40
26	351.42	0.35	0.123	7028.42	2469.94
27	349.26	0.35	0.122	6985.14	2439.61
28	347.01	0.35	0.120	6940.17	2408.30
29	344.53	0.34	0.119	6890.62	2374.03
30	341.84	0.34	0.117	6836.82	2337.11
31	339.04	0.34	0.115	6780.87	2299.01
32	336.00	0.34	0.113	6720.08	2257.97
33	332.81	0.33	0.111	6656.11	2215.19
34	329.42	0.33	0.109	6588.49	2170.41
35	326.06	0.33	0.106	6521.20	2126.30
36	322.35	0.32	0.104	6446.96	2078.17

Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ³)	Power Density (mW/m ³)
37	318.54	0.32	0.101	6370.88	2029.41
38	314.55	0.31	0.099	6290.91	1978.78
39	310.57	0.31	0.096	6211.41	1929.08
40	307.13	0.31	0.094	6142.54	1886.54
41	303.04	0.30	0.092	6060.77	1836.65
42	298.57	0.30	0.089	5971.48	1782.93
43	293.65	0.29	0.086	5873.09	1724.66
44	288.40	0.29	0.083	5768.07	1663.53
45	283.23	0.28	0.080	5664.52	1604.34
46	278.43	0.28	0.078	5568.64	1550.49
47	273.98	0.27	0.075	5479.65	1501.33
48	270.02	0.27	0.073	5400.36	1458.19
49	266.16	0.27	0.071	5323.15	1416.80
50	262.42	0.26	0.069	5248.38	1377.28
51	258.92	0.26	0.067	5178.34	1340.76
52	255.93	0.26	0.065	5118.50	1309.95
53	253.88	0.25	0.064	5077.61	1289.10
54	251.89	0.25	0.063	5037.85	1269.00
55	249.97	0.25	0.062	4999.45	1249.73
56	248.07	0.25	0.062	4961.38	1230.77
57	246.04	0.25	0.061	4920.72	1210.68
58	243.74	0.24	0.059	4874.83	1188.20
59	241.89	0.24	0.059	4837.77	1170.20
60	240.00	0.24	0.058	4800.04	1152.02
61	238.15	0.24	0.057	4762.96	1134.29
62	236.45	0.24	0.056	4728.90	1118.13
63	234.60	0.23	0.055	4691.93	1100.71
64	232.49	0.23	0.054	4649.86	1081.06
65	230.31	0.23	0.053	4606.14	1060.82
66	227.35	0.23	0.052	4547.08	1033.79
67	225.00	0.23	0.051	4500.03	1012.51
68	222.84	0.22	0.050	4456.71	993.11
69	221.03	0.22	0.049	4420.62	977.09
70	218.92	0.22	0.048	4378.42	958.53
71	216.53	0.22	0.047	4330.65	937.73
72	214.33	0.21	0.046	4286.60	918.75
73	212.21	0.21	0.045	4244.24	900.68
74	210.10	0.21	0.044	4202.05	882.86

Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power Density (mW/m ²)
75	208.05	0.21	0.043	4161.06	865.72
76	205.91	0.21	0.042	4118.29	848.02
77	203.87	0.20	0.042	4077.48	831.29
78	201.90	0.20	0.041	4037.98	815.27
79	199.74	0.20	0.040	3994.71	797.89
80	197.71	0.20	0.039	3954.12	781.75
81	195.62	0.20	0.038	3912.40	765.34
82	193.60	0.19	0.037	3872.01	749.62
83	191.73	0.19	0.037	3834.57	735.20
84	189.84	0.19	0.036	3796.81	720.79
85	187.76	0.19	0.035	3755.13	705.05
86	185.95	0.19	0.035	3719.09	691.58
87	184.11	0.18	0.034	3682.13	677.90
88	182.46	0.18	0.033	3649.25	665.85
89	180.77	0.18	0.033	3615.44	653.57
90	178.00	0.18	0.032	3560.09	633.71
91	175.68	0.18	0.031	3513.54	617.25
92	173.44	0.17	0.030	3468.87	601.65
93	171.55	0.17	0.029	3431.05	588.60
94	169.71	0.17	0.029	3394.24	576.04
95	168.52	0.17	0.028	3370.48	568.01
96	167.62	0.17	0.028	3352.34	561.91
97	166.53	0.17	0.028	3330.58	554.64
98	165.10	0.17	0.027	3302.08	545.19
99	163.95	0.16	0.027	3278.91	537.56
100	163.55	0.16	0.027	3271.07	535.00
101	164.58	0.16	0.027	3291.55	541.72
102	164.71	0.16	0.027	3294.27	542.61
103	164.97	0.16	0.027	3299.49	544.33
104	165.70	0.17	0.027	3313.96	549.12
105	166.24	0.17	0.028	3324.83	552.72
106	166.67	0.17	0.028	3333.31	555.55
107	167.07	0.17	0.028	3341.34	558.23
108	167.59	0.17	0.028	3351.88	561.76
109	168.15	0.17	0.028	3362.99	565.49
110	168.61	0.17	0.028	3372.29	568.62
111	169.00	0.17	0.029	3380.01	571.22
112	169.40	0.17	0.029	3387.91	573.90

Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power Density (mW/m ²)
113	169.61	0.17	0.029	3392.15	575.33
114	169.33	0.17	0.029	3386.52	573.43
115	169.22	0.17	0.029	3384.43	572.72
116	169.13	0.17	0.029	3382.67	572.12
117	169.31	0.17	0.029	3386.18	573.31
118	148.64	0.15	0.022	2972.81	441.88
119	99.98	0.10	0.010	1999.65	199.93
120	99.98	0.10	0.010	1999.65	199.93
121	51.94	0.05	0.003	1038.88	53.96
122	49.06	0.05	0.002	981.21	48.14
123	47.38	0.05	0.002	947.51	44.89
124	46.17	0.05	0.002	923.30	42.62
125	44.98	0.04	0.002	899.55	40.46
126	43.74	0.04	0.002	874.88	38.27
127	42.44	0.04	0.002	848.79	36.02
128	41.05	0.04	0.002	820.94	33.70
129	39.64	0.04	0.002	792.74	31.42
130	38.27	0.04	0.001	765.42	29.29
131	37.09	0.04	0.001	741.75	27.51
132	35.88	0.04	0.001	717.62	25.75
133	35.04	0.04	0.001	700.86	24.56
134	34.30	0.03	0.001	686.00	23.53
135	33.78	0.03	0.001	675.53	22.82
136	33.48	0.03	0.001	669.55	22.42
137	33.47	0.03	0.001	669.48	22.41
138	33.61	0.03	0.001	672.28	22.60
139	33.59	0.03	0.001	671.73	22.56
140	33.83	0.03	0.001	676.54	22.89
141	34.50	0.03	0.001	690.04	23.81
142	34.98	0.03	0.001	699.62	24.47
143	35.03	0.04	0.001	700.64	24.54
144	35.29	0.04	0.001	705.86	24.91
145	35.87	0.04	0.001	717.42	25.73
146	36.35	0.04	0.001	726.95	26.42
147	36.66	0.04	0.001	733.26	26.88
148	36.74	0.04	0.001	734.78	26.99
149	37.06	0.04	0.001	741.20	27.47
150	36.92	0.04	0.001	738.37	27.26

Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power Density (mW/m ²)
151	36.75	0.04	0.001	734.97	27.01
152	36.41	0.04	0.001	728.21	26.51
153	36.04	0.04	0.001	720.84	25.98
154	35.67	0.04	0.001	713.35	25.44
155	35.29	0.04	0.001	705.80	24.91
156	34.87	0.03	0.001	697.33	24.31
157	34.35	0.03	0.001	686.98	23.60
158	33.86	0.03	0.001	677.26	22.93
159	28.34	0.03	0.001	566.83	16.06
160	32.68	0.03	0.001	653.52	21.35
161	32.08	0.03	0.001	641.51	20.58
162	31.49	0.03	0.001	629.85	19.84
163	30.81	0.03	0.001	616.28	18.99
164	30.30	0.03	0.001	606.06	18.37
165	29.73	0.03	0.001	594.55	17.67
166	29.25	0.03	0.001	585.01	17.11
167	28.94	0.03	0.001	578.77	16.75
168	28.67	0.03	0.001	573.41	16.44
169	28.38	0.03	0.001	567.65	16.11
170	27.84	0.03	0.001	556.76	15.50
171	26.76	0.03	0.001	535.17	14.32
172	25.77	0.03	0.001	515.37	13.28
173	26.05	0.03	0.001	520.95	13.57
174	26.86	0.03	0.001	537.25	14.43
175	27.62	0.03	0.001	552.35	15.25
176	28.37	0.03	0.001	567.34	16.09
177	29.13	0.03	0.001	582.57	16.97
178	29.79	0.03	0.001	595.72	17.74
179	30.36	0.03	0.001	607.14	18.43
180	30.95	0.03	0.001	618.93	19.15
181	31.49	0.03	0.001	629.72	19.83
182	31.99	0.03	0.001	639.83	20.47
183	32.52	0.03	0.001	650.37	21.15
184	32.92	0.03	0.001	658.38	21.67
185	33.20	0.03	0.001	663.90	22.04
186	33.34	0.03	0.001	666.70	22.22
187	33.23	0.03	0.001	664.60	22.08
188	33.08	0.03	0.001	661.66	21.89

189	32.97	0.03	0.001	659.36	21.74
190	32.99	0.03	0.001	659.77	21.76
191	33.03	0.03	0.001	660.69	21.83
192	32.94	0.03	0.001	658.74	21.70
193	32.71	0.03	0.001	654.14	21.39
194	32.40	0.03	0.001	647.90	20.99
195	31.97	0.03	0.001	639.32	20.44
196	31.53	0.03	0.001	630.60	19.88
197	30.96	0.03	0.001	619.26	19.17
198	30.23	0.03	0.001	604.57	18.28
199	29.42	0.03	0.001	588.44	17.31
200	28.77	0.03	0.001	575.31	16.55
201	28.29	0.03	0.001	565.71	16.00
202	27.78	0.03	0.001	555.53	15.43
203	27.28	0.03	0.001	545.61	14.88
204	26.88	0.03	0.001	537.62	14.45
205	26.75	0.03	0.001	535.09	14.32
206	26.84	0.03	0.001	536.77	14.41
207	27.04	0.03	0.001	540.87	14.63
208	27.18	0.03	0.001	543.67	14.78
209	27.65	0.03	0.001	552.99	15.29
210	27.84	0.03	0.001	556.77	15.50
211	28.23	0.03	0.001	564.54	15.94
212	28.67	0.03	0.001	573.33	16.44
213	28.99	0.03	0.001	579.86	16.81
214	29.34	0.03	0.001	586.76	17.21
215	29.67	0.03	0.001	593.41	17.61
216	29.85	0.03	0.001	596.99	17.82
217	29.77	0.03	0.001	595.47	17.73
218	29.61	0.03	0.001	592.26	17.54
219	29.24	0.03	0.001	584.79	17.10
220	28.78	0.03	0.001	575.69	16.57
221	28.34	0.03	0.001	566.89	16.07
222	27.80	0.03	0.001	556.08	15.46
223	27.21	0.03	0.001	544.13	14.80
224	26.65	0.03	0.001	533.05	14.21
225	26.01	0.03	0.001	520.24	13.53
226	25.27	0.03	0.001	505.41	12.77
227	24.57	0.02	0.001	491.46	12.08

Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ³)	Power Density (mW/m ³)
228	23.86	0.02	0.001	477.28	11.39
229	23.15	0.02	0.001	463.00	10.72
230	22.52	0.02	0.001	450.34	10.14
231	21.85	0.02	0.000	437.00	9.55
232	21.20	0.02	0.000	424.03	8.99
233	20.62	0.02	0.000	412.43	8.51
234	20.16	0.02	0.000	403.15	8.13
235	19.87	0.02	0.000	397.32	7.89
236	19.58	0.02	0.000	391.54	7.67
237	19.54	0.02	0.000	390.72	7.63
238	19.77	0.02	0.000	395.48	7.82
239	20.00	0.02	0.000	400.06	8.00
240	20.00	0.02	0.000	400.06	8.00

ตารางที่ 3 ผลการทดลองขนาดของขั้วไฟฟ้า อัตราส่วนขั้วไฟฟ้าแคโทดต่อแอโนด เท่ากับ 0.5

Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ³)	Power Density (mW/m ³)
1	232.07	0.23	0.054	4641.33	1077.10
2	227.65	0.23	0.052	4553.07	1036.52
3	223.26	0.22	0.050	4465.23	996.92
4	218.90	0.22	0.048	4377.99	958.34
5	214.65	0.21	0.046	4293.02	921.50
6	210.54	0.21	0.044	4210.75	886.52
7	206.66	0.21	0.043	4133.28	854.20
8	203.05	0.20	0.041	4060.99	824.58
9	199.62	0.20	0.040	3992.30	796.92
10	196.25	0.20	0.039	3924.99	770.28
11	192.76	0.19	0.037	3855.10	743.09
12	189.37	0.19	0.036	3787.35	717.20
13	199.31	0.20	0.040	3986.16	794.47
14	183.19	0.18	0.034	3663.71	671.14
15	180.14	0.18	0.032	3602.79	649.01
16	177.11	0.18	0.031	3542.26	627.38
17	174.13	0.17	0.030	3482.65	606.44
18	171.14	0.17	0.029	3422.89	585.81
19	168.18	0.17	0.028	3363.51	565.66

Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power Density (mW/m ²)
20	165.25	0.17	0.027	3304.98	546.14
21	162.41	0.16	0.026	3248.11	527.51
22	159.67	0.16	0.025	3193.48	509.92
23	157.39	0.16	0.025	3147.83	495.44
24	155.10	0.16	0.024	3101.91	481.09
25	152.88	0.15	0.023	3057.62	467.45
26	150.73	0.15	0.023	3014.67	454.41
27	148.59	0.15	0.022	2971.87	441.60
28	146.40	0.15	0.021	2928.03	428.67
29	144.09	0.14	0.021	2881.85	415.25
30	141.74	0.14	0.020	2834.85	401.82
31	139.36	0.14	0.019	2787.22	388.43
32	137.06	0.14	0.019	2741.24	375.72
33	134.89	0.13	0.018	2697.77	363.90
34	132.78	0.13	0.018	2655.55	352.60
35	130.75	0.13	0.017	2615.06	341.93
36	128.89	0.13	0.017	2577.86	332.27
37	127.20	0.13	0.016	2544.10	323.62
38	125.73	0.13	0.016	2514.58	316.16
39	124.54	0.12	0.016	2490.72	310.18
40	123.61	0.12	0.015	2472.16	305.58
41	122.92	0.12	0.015	2458.35	302.17
42	122.17	0.12	0.015	2443.39	298.51
43	121.30	0.12	0.015	2426.01	294.28
44	120.54	0.12	0.015	2410.88	290.62
45	119.84	0.12	0.014	2396.78	287.23
46	119.19	0.12	0.014	2383.88	284.14
47	118.60	0.12	0.014	2372.05	281.33
48	118.02	0.12	0.014	2360.50	278.60
49	117.49	0.12	0.014	2349.74	276.06
50	117.03	0.12	0.014	2340.66	273.94
51	116.62	0.12	0.014	2332.35	271.99
52	116.20	0.12	0.014	2324.03	270.06
53	115.76	0.12	0.013	2315.14	267.99
54	115.31	0.12	0.013	2306.26	265.94
55	114.85	0.11	0.013	2296.90	263.79
56	114.36	0.11	0.013	2287.15	261.55
57	113.74	0.11	0.013	2274.83	258.74

Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ³)	Power Density (mW/m ³)
58	113.34	0.11	0.013	2266.76	256.91
59	112.91	0.11	0.013	2258.16	254.96
60	112.47	0.11	0.013	2249.41	252.99
61	111.92	0.11	0.013	2238.48	250.54
62	111.28	0.11	0.012	2225.66	247.68
63	110.58	0.11	0.012	2211.68	244.58
64	110.41	0.11	0.012	2208.19	243.80
65	110.44	0.11	0.012	2208.74	243.93
66	110.40	0.11	0.012	2208.02	243.77
67	110.46	0.11	0.012	2209.11	244.01
68	110.55	0.11	0.012	2210.93	244.41
69	110.22	0.11	0.012	2204.35	242.96
70	109.74	0.11	0.012	2194.73	240.84
71	109.26	0.11	0.012	2185.12	238.74
72	108.71	0.11	0.012	2174.12	236.34
73	108.07	0.11	0.012	2161.45	233.59
74	107.35	0.11	0.012	2147.00	230.48
75	106.55	0.11	0.011	2130.91	227.04
76	105.67	0.11	0.011	2113.35	223.31
77	104.74	0.10	0.011	2094.86	219.42
78	103.79	0.10	0.011	2075.84	215.46
79	102.79	0.10	0.011	2055.78	211.31
80	101.77	0.10	0.010	2035.34	207.13
81	100.74	0.10	0.010	2014.75	202.96
82	99.73	0.10	0.010	1994.56	198.91
83	98.79	0.10	0.010	1975.90	195.21
84	97.91	0.10	0.010	1958.15	191.72
85	97.02	0.10	0.009	1940.43	188.26
86	96.19	0.10	0.009	1923.81	185.05
87	95.40	0.10	0.009	1907.91	182.01
88	94.58	0.09	0.009	1891.64	178.92
89	93.76	0.09	0.009	1875.12	175.80
90	92.88	0.09	0.009	1857.64	172.54
91	92.03	0.09	0.008	1840.55	169.38
92	91.18	0.09	0.008	1823.68	166.29
93	90.39	0.09	0.008	1807.83	163.41
94	89.60	0.09	0.008	1791.95	160.55
95	88.84	0.09	0.008	1776.81	157.85

Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power Density (mW/m ²)
96	88.15	0.09	0.008	1762.99	155.41
97	87.50	0.09	0.008	1750.03	153.13
98	86.91	0.09	0.008	1738.22	151.07
99	86.43	0.09	0.007	1728.65	149.41
100	86.09	0.09	0.007	1721.82	148.23
101	85.87	0.09	0.007	1717.50	147.49
102	85.79	0.09	0.007	1715.83	147.20
103	85.82	0.09	0.007	1716.31	147.29
104	85.94	0.09	0.007	1718.73	147.70
105	86.08	0.09	0.007	1721.51	148.18
106	86.27	0.09	0.007	1725.45	148.86
107	86.56	0.09	0.007	1731.29	149.87
108	86.83	0.09	0.008	1736.52	150.78
109	87.04	0.09	0.008	1740.71	151.50
110	87.22	0.09	0.008	1744.48	152.16
111	87.42	0.09	0.008	1748.39	152.84
112	87.60	0.09	0.008	1752.06	153.49
113	87.81	0.09	0.008	1756.10	154.19
114	87.99	0.09	0.008	1759.72	154.83
115	88.18	0.09	0.008	1763.65	155.52
116	88.35	0.09	0.008	1766.95	156.11
117	88.62	0.09	0.008	1772.31	157.05
118	81.11	0.08	0.007	1622.15	131.57
119	58.25	0.06	0.003	1165.03	67.87
120	58.25	0.06	0.003	1165.03	67.87
121	39.82	0.04	0.002	796.43	31.72
122	39.15	0.04	0.002	783.04	30.66
123	38.74	0.04	0.002	774.87	30.02
124	38.34	0.04	0.001	766.73	29.39
125	37.56	0.04	0.001	751.22	28.22
126	36.48	0.04	0.001	729.67	26.62
127	35.38	0.04	0.001	707.54	25.03
128	34.23	0.03	0.001	684.58	23.43
129	33.09	0.03	0.001	661.85	21.90
130	31.85	0.03	0.001	636.95	20.29
131	31.17	0.03	0.001	623.40	19.43
132	30.44	0.03	0.001	608.87	18.54
133	29.76	0.03	0.001	595.19	17.71

Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power Density (mW/m ²)
134	29.16	0.03	0.001	583.29	17.01
135	28.69	0.03	0.001	573.86	16.47
136	28.51	0.03	0.001	570.10	16.25
137	28.28	0.03	0.001	565.59	15.99
138	27.92	0.03	0.001	558.48	15.60
139	27.44	0.03	0.001	548.71	15.05
140	27.17	0.03	0.001	543.41	14.76
141	27.32	0.03	0.001	546.34	14.92
142	27.81	0.03	0.001	556.14	15.46
143	28.49	0.03	0.001	569.74	16.23
144	28.95	0.03	0.001	579.06	16.77
145	29.53	0.03	0.001	590.61	17.44
146	30.22	0.03	0.001	604.47	18.27
147	30.82	0.03	0.001	616.42	19.00
148	31.28	0.03	0.001	625.63	19.57
149	31.54	0.03	0.001	630.88	19.90
150	31.85	0.03	0.001	636.98	20.29
151	32.28	0.03	0.001	645.57	20.84
152	32.79	0.03	0.001	655.79	21.50
153	33.23	0.03	0.001	664.63	22.09
154	33.40	0.03	0.001	667.96	22.31
155	33.28	0.03	0.001	665.52	22.15
156	33.18	0.03	0.001	663.68	22.02
157	33.19	0.03	0.001	663.90	22.04
158	33.21	0.03	0.001	664.26	22.06
159	19.81	0.02	0.000	396.25	7.85
160	32.81	0.03	0.001	656.21	21.53
161	32.75	0.03	0.001	655.01	21.45
162	32.75	0.03	0.001	655.01	21.45
163	32.48	0.03	0.001	649.52	21.09
164	32.27	0.03	0.001	645.33	20.82
165	30.91	0.03	0.001	618.22	19.11
166	27.27	0.03	0.001	545.34	14.87
167	24.89	0.02	0.001	497.80	12.39
168	23.41	0.02	0.001	468.27	10.96
169	22.39	0.02	0.001	447.90	10.03
170	21.32	0.02	0.000	426.39	9.09
171	20.31	0.02	0.000	406.16	8.25

Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power Density (mW/m ²)
172	19.65	0.02	0.000	393.06	7.72
173	19.57	0.02	0.000	391.50	7.66
174	19.92	0.02	0.000	398.36	7.93
175	20.31	0.02	0.000	406.15	8.25
176	20.61	0.02	0.000	412.28	8.50
177	20.84	0.02	0.000	416.74	8.68
178	21.02	0.02	0.000	420.41	8.84
179	21.21	0.02	0.000	424.15	9.00
180	21.33	0.02	0.000	426.63	9.10
181	21.42	0.02	0.000	428.32	9.17
182	21.55	0.02	0.000	430.93	9.29
183	21.65	0.02	0.000	433.01	9.37
184	21.66	0.02	0.000	433.19	9.38
185	21.59	0.02	0.000	431.86	9.33
186	21.40	0.02	0.000	428.06	9.16
187	21.10	0.02	0.000	421.92	8.90
188	20.76	0.02	0.000	415.30	8.62
189	20.42	0.02	0.000	408.47	8.34
190	20.18	0.02	0.000	403.61	8.15
191	19.93	0.02	0.000	398.58	7.94
192	19.60	0.02	0.000	391.91	7.68
193	19.22	0.02	0.000	384.48	7.39
194	18.89	0.02	0.000	377.74	7.13
195	18.47	0.02	0.000	369.38	6.82
196	18.10	0.02	0.000	361.94	6.55
197	17.55	0.02	0.000	351.00	6.16
198	16.97	0.02	0.000	339.47	5.76
199	16.53	0.02	0.000	330.61	5.47
200	16.28	0.02	0.000	325.64	5.30
201	16.12	0.02	0.000	322.37	5.20
202	15.93	0.02	0.000	318.54	5.07
203	15.80	0.02	0.000	316.03	4.99
204	15.74	0.02	0.000	314.88	4.96
205	15.94	0.02	0.000	318.75	5.08
206	16.30	0.02	0.000	325.93	5.31
207	16.72	0.02	0.000	334.43	5.59
208	17.13	0.02	0.000	342.51	5.87
209	17.81	0.02	0.000	356.12	6.34

Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ³)	Power Density (mW/m ³)
210	18.03	0.02	0.000	360.54	6.50
211	18.43	0.02	0.000	368.70	6.80
212	18.83	0.02	0.000	376.54	7.09
213	19.16	0.02	0.000	383.16	7.34
214	19.42	0.02	0.000	388.48	7.55
215	19.55	0.02	0.000	391.06	7.65
216	19.57	0.02	0.000	391.49	7.66
217	19.47	0.02	0.000	389.41	7.58
218	19.25	0.02	0.000	385.10	7.41
219	19.04	0.02	0.000	380.74	7.25
220	18.83	0.02	0.000	376.55	7.09
221	18.61	0.02	0.000	372.13	6.92
222	18.34	0.02	0.000	366.80	6.73
223	18.04	0.02	0.000	360.89	6.51
224	17.74	0.02	0.000	354.79	6.29
225	17.40	0.02	0.000	348.06	6.06
226	17.04	0.02	0.000	340.77	5.81
227	16.67	0.02	0.000	333.37	5.56
228	16.24	0.02	0.000	324.75	5.27
229	15.80	0.02	0.000	316.03	4.99
230	15.45	0.02	0.000	308.97	4.77
231	15.05	0.02	0.000	300.96	4.53
232	14.67	0.01	0.000	293.34	4.30
233	14.34	0.01	0.000	286.90	4.12
234	14.08	0.01	0.000	281.69	3.97
235	13.93	0.01	0.000	278.52	3.88
236	13.83	0.01	0.000	276.55	3.82
237	14.01	0.01	0.000	280.23	3.93
238	14.38	0.01	0.000	287.50	4.13
239	14.64	0.01	0.000	292.77	4.29
240	14.64	0.01	0.000	292.77	4.29

ตารางที่ 4 ผลการทดลองขนาดของขั้วไฟฟ้า อัตราส่วนขั้วไฟฟ้าแคโทดต่อแอโนด เท่ากับ 0.75

Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power Density (mW/m ²)
1	545.99	0.55	0.298	10919.85	5962.15
2	546.47	0.55	0.299	10929.41	5972.60
3	546.76	0.55	0.299	10935.20	5978.93
4	546.81	0.55	0.299	10936.20	5980.02
5	546.77	0.55	0.299	10935.36	5979.10
6	546.86	0.55	0.299	10937.17	5981.08
7	546.96	0.55	0.299	10939.28	5983.39
8	547.04	0.55	0.299	10940.88	5985.14
9	545.57	0.55	0.298	10911.37	5952.90
10	544.51	0.54	0.296	10890.19	5929.81
11	544.04	0.54	0.296	10880.74	5919.52
12	544.59	0.54	0.297	10891.75	5931.51
13	545.61	0.55	0.298	10912.26	5953.87
14	543.50	0.54	0.295	10870.09	5907.94
15	543.40	0.54	0.295	10868.08	5905.76
16	543.12	0.54	0.295	10862.34	5899.52
17	542.63	0.54	0.294	10852.62	5888.96
18	542.14	0.54	0.294	10842.79	5878.31
19	541.59	0.54	0.293	10831.77	5866.36
20	540.79	0.54	0.292	10815.79	5849.06
21	539.80	0.54	0.291	10796.02	5827.70
22	538.99	0.54	0.291	10779.86	5810.27
23	538.26	0.54	0.290	10765.11	5794.38
24	537.65	0.54	0.289	10753.08	5781.43
25	537.12	0.54	0.289	10742.48	5770.04
26	536.49	0.54	0.288	10729.80	5756.43
27	535.84	0.54	0.287	10716.72	5742.41
28	534.96	0.53	0.286	10699.11	5723.55
29	533.67	0.53	0.285	10673.44	5696.11
30	531.34	0.53	0.282	10626.78	5646.43
31	527.12	0.53	0.278	10542.49	5557.21
32	524.29	0.52	0.275	10485.79	5497.59
33	522.05	0.52	0.273	10441.10	5450.83
34	519.98	0.52	0.270	10399.50	5407.48
35	517.67	0.52	0.268	10353.44	5359.69
36	515.81	0.52	0.266	10316.22	5321.22

Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ³)	Power Density (mW/m ³)
37	514.13	0.51	0.264	10282.66	5286.65
38	512.74	0.51	0.263	10254.79	5258.04
39	512.05	0.51	0.262	10240.97	5243.87
40	511.98	0.51	0.262	10239.68	5242.55
41	512.33	0.51	0.262	10246.59	5249.64
42	512.77	0.51	0.263	10255.48	5258.74
43	513.38	0.51	0.264	10267.65	5271.24
44	513.81	0.51	0.264	10276.27	5280.09
45	514.11	0.51	0.264	10282.23	5286.21
46	514.36	0.51	0.265	10287.29	5291.42
47	514.61	0.51	0.265	10292.11	5296.38
48	514.87	0.51	0.265	10297.34	5301.76
49	515.06	0.52	0.265	10301.23	5305.77
50	515.29	0.52	0.266	10305.77	5310.44
51	515.65	0.52	0.266	10313.02	5317.92
52	516.13	0.52	0.266	10322.69	5327.89
53	516.47	0.52	0.267	10329.33	5334.75
54	517.47	0.52	0.268	10349.44	5355.55
55	518.17	0.52	0.269	10363.49	5370.09
56	518.71	0.52	0.269	10374.23	5381.23
57	519.16	0.52	0.270	10383.25	5390.60
58	518.23	0.52	0.269	10364.54	5371.18
59	517.20	0.52	0.267	10344.01	5349.93
60	516.64	0.52	0.267	10332.80	5338.34
61	516.18	0.52	0.266	10323.62	5328.85
62	515.55	0.52	0.266	10311.01	5315.85
63	515.16	0.52	0.265	10303.22	5307.82
64	515.82	0.52	0.266	10316.35	5321.35
65	516.26	0.52	0.267	10325.10	5330.39
66	515.98	0.52	0.266	10319.59	5324.70
67	515.49	0.52	0.266	10309.79	5314.59
68	514.94	0.51	0.265	10298.76	5303.22
69	514.40	0.51	0.265	10288.04	5292.19
70	514.02	0.51	0.264	10280.39	5284.33
71	513.63	0.51	0.264	10272.66	5276.38
72	513.15	0.51	0.263	10263.05	5266.51
73	512.50	0.51	0.263	10249.92	5253.04
74	511.81	0.51	0.262	10236.17	5238.96

Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power Density (mW/m ²)
75	510.91	0.51	0.261	10218.23	5220.61
76	509.89	0.51	0.260	10197.88	5199.84
77	508.79	0.51	0.259	10175.78	5177.33
78	507.61	0.51	0.258	10152.29	5153.45
79	506.37	0.51	0.256	10127.32	5128.13
80	504.82	0.50	0.255	10096.38	5096.85
81	503.28	0.50	0.253	10065.61	5065.83
82	501.78	0.50	0.252	10035.54	5035.60
83	500.32	0.50	0.250	10006.49	5006.49
84	498.91	0.50	0.249	9978.28	4978.30
85	497.38	0.50	0.247	9947.62	4947.75
86	495.70	0.50	0.246	9913.96	4914.33
87	494.05	0.49	0.244	9880.97	4881.68
88	492.21	0.49	0.242	9844.11	4845.32
89	490.16	0.49	0.240	9803.25	4805.18
90	487.69	0.49	0.238	9753.88	4756.91
91	485.11	0.49	0.235	9702.15	4706.58
92	482.56	0.48	0.233	9651.25	4657.33
93	480.12	0.48	0.231	9602.42	4610.32
94	477.74	0.48	0.228	9554.84	4564.75
95	475.31	0.48	0.226	9506.15	4518.35
96	473.05	0.47	0.224	9460.97	4475.50
97	470.76	0.47	0.222	9415.20	4432.30
98	468.51	0.47	0.220	9370.23	4390.06
99	466.47	0.47	0.218	9329.43	4351.91
100	464.79	0.46	0.216	9295.70	4320.50
101	463.62	0.46	0.215	9272.31	4298.79
102	462.80	0.46	0.214	9255.92	4283.60
103	462.12	0.46	0.214	9242.34	4271.04
104	461.40	0.46	0.213	9227.91	4257.72
105	459.37	0.46	0.211	9187.42	4220.44
106	456.21	0.46	0.208	9124.29	4162.64
107	454.07	0.45	0.206	9081.49	4123.67
108	452.34	0.45	0.205	9046.82	4092.24
109	450.68	0.45	0.203	9013.65	4062.30
110	449.13	0.45	0.202	8982.60	4034.36
111	447.55	0.45	0.200	8950.94	4005.96
112	445.90	0.45	0.199	8917.92	3976.46

Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ³)	Power Density (mW/m ³)
113	444.32	0.44	0.197	8886.35	3948.36
114	442.70	0.44	0.196	8853.97	3919.64
115	441.06	0.44	0.195	8821.14	3890.63
116	440.13	0.44	0.194	8802.51	3874.21
117	439.92	0.44	0.194	8798.45	3870.64
118	420.27	0.42	0.177	8405.31	3532.46
119	297.99	0.30	0.089	5959.85	1775.99
120	297.99	0.30	0.089	5959.85	1775.99
121	181.07	0.18	0.033	3621.38	655.72
122	168.52	0.17	0.028	3370.49	568.01
123	158.41	0.16	0.025	3168.26	501.89
124	150.40	0.15	0.023	3007.96	452.39
125	143.52	0.14	0.021	2870.46	411.98
126	137.15	0.14	0.019	2742.99	376.20
127	130.96	0.13	0.017	2619.28	343.03
128	125.31	0.13	0.016	2506.15	314.04
129	119.78	0.12	0.014	2395.58	286.94
130	114.01	0.11	0.013	2280.12	259.95
131	110.11	0.11	0.012	2202.28	242.50
132	105.99	0.11	0.011	2119.72	224.66
133	102.50	0.10	0.011	2049.99	210.12
134	99.49	0.10	0.010	1989.78	197.96
135	96.63	0.10	0.009	1932.56	186.74
136	95.22	0.10	0.009	1904.38	181.33
137	93.78	0.09	0.009	1875.64	175.90
138	91.48	0.09	0.008	1829.66	167.38
139	89.05	0.09	0.008	1781.09	158.61
140	87.58	0.09	0.008	1751.68	153.42
141	87.89	0.09	0.008	1757.76	154.49
142	89.68	0.09	0.008	1793.66	160.86
143	91.88	0.09	0.008	1837.50	168.82
144	93.87	0.09	0.009	1877.40	176.23
145	95.45	0.10	0.009	1908.93	182.20
146	96.53	0.10	0.009	1930.61	186.36
147	97.41	0.10	0.009	1948.21	189.78
148	98.15	0.10	0.010	1962.94	192.66
149	98.74	0.10	0.010	1974.87	195.01
150	99.30	0.10	0.010	1986.00	197.21

Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power Density (mW/m ²)
151	100.05	0.10	0.010	2000.97	200.19
152	100.73	0.10	0.010	2014.52	202.91
153	100.13	0.10	0.010	2002.64	200.53
154	98.66	0.10	0.010	1973.20	194.68
155	97.62	0.10	0.010	1952.49	190.61
156	96.41	0.10	0.009	1928.12	185.88
157	94.30	0.09	0.009	1886.08	177.86
158	92.87	0.09	0.009	1857.41	172.50
159	56.37	0.06	0.003	1127.32	63.54
160	89.14	0.09	0.008	1782.72	158.90
161	86.98	0.09	0.008	1739.52	151.30
162	84.76	0.08	0.007	1695.11	143.67
163	81.65	0.08	0.007	1632.97	133.33
164	79.75	0.08	0.006	1595.00	127.20
165	77.29	0.08	0.006	1545.87	119.49
166	75.04	0.08	0.006	1500.72	112.61
167	74.08	0.07	0.005	1481.60	109.76
168	73.24	0.07	0.005	1464.74	107.27
169	72.10	0.07	0.005	1442.04	103.97
170	68.72	0.07	0.005	1374.32	94.44
171	63.70	0.06	0.004	1273.95	81.15
172	61.00	0.06	0.004	1219.97	74.42
173	62.06	0.06	0.004	1241.23	77.03
174	65.52	0.07	0.004	1310.44	85.86
175	69.33	0.07	0.005	1386.52	96.12
176	72.76	0.07	0.005	1455.30	105.89
177	75.31	0.08	0.006	1506.27	113.44
178	75.90	0.08	0.006	1518.00	115.22
179	75.77	0.08	0.006	1515.41	114.82
180	75.70	0.08	0.006	1514.03	114.61
181	74.73	0.07	0.006	1494.54	111.68
182	75.23	0.08	0.006	1504.52	113.18
183	75.72	0.08	0.006	1514.34	114.66
184	75.52	0.08	0.006	1510.34	114.06
185	74.47	0.07	0.006	1489.32	110.90
186	73.53	0.07	0.005	1470.63	108.14
187	71.92	0.07	0.005	1438.43	103.45
188	70.31	0.07	0.005	1406.23	98.87

Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power Density (mW/m ²)
189	68.67	0.07	0.005	1373.45	94.32
190	67.69	0.07	0.005	1353.82	91.64
191	66.81	0.07	0.004	1336.12	89.26
192	65.69	0.07	0.004	1313.72	86.29
193	64.31	0.06	0.004	1286.12	82.71
194	63.01	0.06	0.004	1260.13	79.40
195	61.49	0.06	0.004	1229.77	75.62
196	60.13	0.06	0.004	1202.55	72.31
197	58.23	0.06	0.003	1164.55	67.81
198	55.81	0.06	0.003	1116.17	62.29
199	52.25	0.05	0.003	1045.07	54.61
200	50.74	0.05	0.003	1014.73	51.48
201	49.92	0.05	0.002	998.35	49.84
202	49.07	0.05	0.002	981.48	48.16
203	48.27	0.05	0.002	965.37	46.60
204	47.59	0.05	0.002	951.75	45.29
205	47.59	0.05	0.002	951.74	45.29
206	47.93	0.05	0.002	958.64	45.95
207	48.48	0.05	0.002	969.54	47.00
208	48.89	0.05	0.002	977.84	47.81
209	49.41	0.05	0.002	988.26	48.83
210	49.63	0.05	0.002	992.50	49.25
211	49.88	0.05	0.002	997.56	49.76
212	50.01	0.05	0.003	1000.12	50.01
213	50.06	0.05	0.003	1001.20	50.12
214	50.29	0.05	0.003	1005.82	50.58
215	50.24	0.05	0.003	1004.88	50.49
216	49.93	0.05	0.002	998.68	49.87
217	49.37	0.05	0.002	987.41	48.75
218	48.42	0.05	0.002	968.31	46.88
219	47.04	0.05	0.002	940.88	44.26
220	45.60	0.05	0.002	912.07	41.59
221	44.48	0.04	0.002	889.64	39.57
222	43.25	0.04	0.002	864.91	37.40
223	41.96	0.04	0.002	839.26	35.22
224	40.21	0.04	0.002	804.29	32.34
225	37.11	0.04	0.001	742.21	27.54
226	34.50	0.03	0.001	690.10	23.81

Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ³)	Power Density (mW/m ³)
227	32.75	0.03	0.001	655.10	21.46
228	31.15	0.03	0.001	623.00	19.41
229	29.75	0.03	0.001	594.94	17.70
230	28.61	0.03	0.001	572.11	16.37
231	27.64	0.03	0.001	552.76	15.28
232	26.72	0.03	0.001	534.42	14.28
233	25.93	0.03	0.001	518.57	13.45
234	25.13	0.03	0.001	502.61	12.63
235	24.45	0.02	0.001	489.08	11.96
236	23.93	0.02	0.001	478.65	11.46
237	23.85	0.02	0.001	477.06	11.38
238	24.06	0.02	0.001	481.24	11.58
239	24.24	0.02	0.001	484.74	11.75
240	24.24	0.02	0.001	484.74	11.75

ตารางที่ 5 ผลการทดลองขนาดของขั้วไฟฟ้า อัตราส่วนขั้วไฟฟ้าแคโทดต่อแอโนด เท่ากับ 1.33

Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ³)	Power Density (mW/m ³)
1	75.53	0.08	0.006	1510.68	114.11
2	75.17	0.08	0.006	1503.47	113.02
3	74.82	0.07	0.006	1496.30	111.95
4	74.45	0.07	0.006	1488.99	110.85
5	73.99	0.07	0.005	1479.79	109.49
6	73.50	0.07	0.005	1469.92	108.03
7	73.03	0.07	0.005	1460.59	106.67
8	72.52	0.07	0.005	1450.45	105.19
9	72.01	0.07	0.005	1440.30	103.72
10	71.51	0.07	0.005	1430.14	102.27
11	70.97	0.07	0.005	1419.32	100.72
12	70.45	0.07	0.005	1408.97	99.26
13	71.94	0.07	0.005	1438.75	103.50
14	69.45	0.07	0.005	1389.02	96.47
15	68.94	0.07	0.005	1378.78	95.05
16	68.42	0.07	0.005	1368.36	93.62
17	67.88	0.07	0.005	1357.66	92.16
18	67.33	0.07	0.005	1346.63	90.67

Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power Density (mW/m ²)
19	66.72	0.07	0.004	1334.41	89.03
20	66.07	0.07	0.004	1321.47	87.31
21	65.46	0.07	0.004	1309.23	85.70
22	64.85	0.06	0.004	1296.96	84.10
23	64.20	0.06	0.004	1284.06	82.44
24	63.57	0.06	0.004	1271.46	80.83
25	62.95	0.06	0.004	1258.95	79.25
26	62.28	0.06	0.004	1245.58	77.57
27	61.62	0.06	0.004	1232.36	75.94
28	60.99	0.06	0.004	1219.88	74.40
29	60.37	0.06	0.004	1207.45	72.90
30	59.76	0.06	0.004	1195.17	71.42
31	59.12	0.06	0.003	1182.46	69.91
32	58.47	0.06	0.003	1169.38	68.37
33	57.79	0.06	0.003	1155.84	66.80
34	57.10	0.06	0.003	1142.00	65.21
35	56.46	0.06	0.003	1129.11	63.74
36	55.83	0.06	0.003	1116.60	62.34
37	55.22	0.06	0.003	1104.45	60.99
38	54.65	0.05	0.003	1092.94	59.73
39	54.16	0.05	0.003	1083.12	58.66
40	53.75	0.05	0.003	1074.94	57.77
41	53.36	0.05	0.003	1067.26	56.95
42	52.95	0.05	0.003	1059.07	56.08
43	52.64	0.05	0.003	1052.72	55.41
44	52.42	0.05	0.003	1048.36	54.95
45	52.19	0.05	0.003	1043.71	54.47
46	51.96	0.05	0.003	1039.28	54.00
47	51.75	0.05	0.003	1035.04	53.57
48	51.49	0.05	0.003	1029.74	53.02
49	51.23	0.05	0.003	1024.52	52.48
50	50.99	0.05	0.003	1019.73	51.99
51	50.75	0.05	0.003	1014.97	51.51
52	50.51	0.05	0.003	1010.15	51.02
53	50.36	0.05	0.003	1007.11	50.71
54	50.24	0.05	0.003	1004.72	50.47
55	50.05	0.05	0.003	1001.04	50.10
56	49.86	0.05	0.002	997.24	49.72

Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power Density (mW/m ²)
57	49.50	0.05	0.002	989.95	49.00
58	49.10	0.05	0.002	982.03	48.22
59	48.81	0.05	0.002	976.16	47.64
60	48.48	0.05	0.002	969.51	47.00
61	48.13	0.05	0.002	962.63	46.33
62	47.72	0.05	0.002	954.49	45.55
63	47.27	0.05	0.002	945.35	44.68
64	46.75	0.05	0.002	935.04	43.71
65	46.20	0.05	0.002	924.07	42.70
66	45.57	0.05	0.002	911.34	41.53
67	44.97	0.04	0.002	899.37	40.44
68	44.32	0.04	0.002	886.36	39.28
69	43.74	0.04	0.002	874.78	38.26
70	43.16	0.04	0.002	863.22	37.26
71	42.57	0.04	0.002	851.35	36.24
72	41.99	0.04	0.002	839.83	35.27
73	41.43	0.04	0.002	828.68	34.34
74	40.90	0.04	0.002	818.03	33.46
75	40.44	0.04	0.002	808.82	32.71
76	39.99	0.04	0.002	799.75	31.98
77	39.52	0.04	0.002	790.45	31.24
78	39.02	0.04	0.002	780.46	30.46
79	38.49	0.04	0.001	769.74	29.63
80	37.99	0.04	0.001	759.72	28.86
81	37.49	0.04	0.001	749.84	28.11
82	36.97	0.04	0.001	739.43	27.34
83	36.46	0.04	0.001	729.10	26.58
84	35.91	0.04	0.001	718.18	25.79
85	35.38	0.04	0.001	707.63	25.04
86	34.91	0.03	0.001	698.16	24.37
87	34.42	0.03	0.001	688.48	23.70
88	33.93	0.03	0.001	678.61	23.03
89	33.45	0.03	0.001	668.91	22.37
90	32.94	0.03	0.001	658.77	21.70
91	32.47	0.03	0.001	649.32	21.08
92	32.04	0.03	0.001	640.90	20.54
93	31.63	0.03	0.001	632.52	20.00
94	31.23	0.03	0.001	624.54	19.50

Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power Density (mW/m ²)
95	30.83	0.03	0.001	616.51	19.00
96	30.44	0.03	0.001	608.77	18.53
97	30.09	0.03	0.001	601.78	18.11
98	29.78	0.03	0.001	595.66	17.74
99	29.50	0.03	0.001	589.96	17.40
100	29.23	0.03	0.001	584.58	17.09
101	28.96	0.03	0.001	579.16	16.77
102	28.74	0.03	0.001	574.78	16.52
103	28.54	0.03	0.001	570.90	16.30
104	28.43	0.03	0.001	568.60	16.17
105	28.32	0.03	0.001	566.44	16.04
106	28.27	0.03	0.001	565.32	15.98
107	28.27	0.03	0.001	565.41	15.98
108	28.26	0.03	0.001	565.19	15.97
109	28.23	0.03	0.001	564.62	15.94
110	28.22	0.03	0.001	564.37	15.93
111	28.24	0.03	0.001	564.85	15.95
112	28.26	0.03	0.001	565.14	15.97
113	28.23	0.03	0.001	564.69	15.94
114	28.23	0.03	0.001	564.57	15.94
115	28.19	0.03	0.001	563.83	15.90
116	28.20	0.03	0.001	563.99	15.90
117	28.12	0.03	0.001	562.38	15.81
118	23.95	0.02	0.001	479.08	11.48
119	21.53	0.02	0.000	430.68	9.27
120	21.53	0.02	0.000	430.68	9.27
121	16.31	0.02	0.000	326.11	5.32
122	16.41	0.02	0.000	328.26	5.39
123	16.69	0.02	0.000	333.72	5.57
124	16.79	0.02	0.000	335.74	5.64
125	16.74	0.02	0.000	334.87	5.61
126	16.58	0.02	0.000	331.64	5.50
127	16.45	0.02	0.000	329.03	5.41
128	16.31	0.02	0.000	326.19	5.32
129	16.15	0.02	0.000	323.04	5.22
130	15.93	0.02	0.000	318.68	5.08
131	15.81	0.02	0.000	316.26	5.00
132	15.70	0.02	0.000	313.96	4.93

Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power Density (mW/m ²)
133	15.56	0.02	0.000	311.27	4.84
134	15.46	0.02	0.000	309.26	4.78
135	15.39	0.02	0.000	307.87	4.74
136	15.47	0.02	0.000	309.46	4.79
137	15.59	0.02	0.000	311.74	4.86
138	15.65	0.02	0.000	313.08	4.90
139	15.66	0.02	0.000	313.23	4.91
140	15.76	0.02	0.000	315.25	4.97
141	16.08	0.02	0.000	321.64	5.17
142	16.80	0.02	0.000	336.00	5.64
143	17.82	0.02	0.000	356.35	6.35
144	19.02	0.02	0.000	380.48	7.24
145	20.39	0.02	0.000	407.87	8.32
146	21.72	0.02	0.000	434.48	9.44
147	23.01	0.02	0.001	460.24	10.59
148	24.32	0.02	0.001	486.48	11.83
149	25.63	0.03	0.001	512.59	13.14
150	27.07	0.03	0.001	541.35	14.65
151	28.49	0.03	0.001	569.82	16.23
152	29.86	0.03	0.001	597.12	17.83
153	31.07	0.03	0.001	621.46	19.31
154	32.17	0.03	0.001	643.46	20.70
155	33.29	0.03	0.001	665.89	22.17
156	34.34	0.03	0.001	686.70	23.58
157	35.00	0.03	0.001	699.95	24.50
158	35.51	0.04	0.001	710.28	25.23
159	31.18	0.03	0.001	623.61	19.44
160	35.91	0.04	0.001	718.25	25.79
161	35.67	0.04	0.001	713.43	25.45
162	35.09	0.04	0.001	701.85	24.63
163	34.28	0.03	0.001	685.67	23.51
164	33.54	0.03	0.001	670.88	22.50
165	32.58	0.03	0.001	651.63	21.23
166	31.15	0.03	0.001	622.91	19.40
167	29.59	0.03	0.001	591.89	17.52
168	28.34	0.03	0.001	566.84	16.07
169	27.37	0.03	0.001	547.33	14.98
170	26.35	0.03	0.001	526.95	13.88

Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power Density (mW/m ²)
171	25.11	0.03	0.001	502.15	12.61
172	24.22	0.02	0.001	484.44	11.73
173	24.14	0.02	0.001	482.86	11.66
174	24.91	0.02	0.001	498.28	12.41
175	26.36	0.03	0.001	527.23	13.90
176	28.03	0.03	0.001	560.68	15.72
177	29.73	0.03	0.001	594.56	17.68
178	31.43	0.03	0.001	628.58	19.76
179	33.30	0.03	0.001	665.94	22.17
180	35.19	0.04	0.001	703.71	24.76
181	37.03	0.04	0.001	740.59	27.42
182	38.77	0.04	0.002	775.33	30.06
183	40.34	0.04	0.002	806.79	32.55
184	41.69	0.04	0.002	833.70	34.75
185	42.88	0.04	0.002	857.70	36.78
186	43.78	0.04	0.002	875.52	38.33
187	44.31	0.04	0.002	886.19	39.27
188	44.61	0.04	0.002	892.28	39.81
189	44.69	0.04	0.002	893.73	39.94
190	44.82	0.04	0.002	896.34	40.17
191	44.90	0.04	0.002	897.92	40.31
192	44.85	0.04	0.002	897.03	40.23
193	44.70	0.04	0.002	894.00	39.96
194	44.60	0.04	0.002	891.92	39.78
195	43.88	0.04	0.002	877.63	38.51
196	42.74	0.04	0.002	854.78	36.53
197	41.11	0.04	0.002	822.27	33.81
198	38.19	0.04	0.001	763.72	29.16
199	35.74	0.04	0.001	714.77	25.54
200	34.01	0.03	0.001	680.11	23.13
201	32.61	0.03	0.001	652.27	21.27
202	31.31	0.03	0.001	626.18	19.60
203	30.14	0.03	0.001	602.86	18.17
204	29.07	0.03	0.001	581.34	16.90
205	28.36	0.03	0.001	567.13	16.08
206	27.99	0.03	0.001	559.85	15.67
207	27.66	0.03	0.001	553.22	15.30
208	27.24	0.03	0.001	544.87	14.84

Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power Density (mW/m ²)
209	27.32	0.03	0.001	546.32	14.92
210	27.47	0.03	0.001	549.47	15.10
211	27.85	0.03	0.001	557.07	15.52
212	28.42	0.03	0.001	568.47	16.16
213	29.08	0.03	0.001	581.56	16.91
214	29.62	0.03	0.001	592.39	17.55
215	30.05	0.03	0.001	601.10	18.07
216	30.34	0.03	0.001	606.86	18.41
217	30.55	0.03	0.001	611.08	18.67
218	30.69	0.03	0.001	613.83	18.84
219	30.80	0.03	0.001	616.02	18.97
220	30.71	0.03	0.001	614.23	18.86
221	30.49	0.03	0.001	609.89	18.60
222	30.05	0.03	0.001	601.02	18.06
223	29.41	0.03	0.001	588.27	17.30
224	28.66	0.03	0.001	573.19	16.43
225	27.75	0.03	0.001	555.05	15.40
226	26.79	0.03	0.001	535.82	14.36
227	25.57	0.03	0.001	511.40	13.08
228	24.14	0.02	0.001	482.75	11.65
229	22.79	0.02	0.001	455.77	10.39
230	21.51	0.02	0.000	430.11	9.25
231	20.33	0.02	0.000	406.57	8.27
232	19.24	0.02	0.000	384.85	7.41
233	18.29	0.02	0.000	365.82	6.69
234	17.44	0.02	0.000	348.72	6.08
235	16.71	0.02	0.000	334.29	5.59
236	16.11	0.02	0.000	322.26	5.19
237	15.79	0.02	0.000	315.84	4.99
238	15.69	0.02	0.000	313.89	4.93
239	15.70	0.02	0.000	314.00	4.93
240	15.70	0.02	0.000	314.00	4.93

ตารางที่ 6 ผลการทดลองขนาดของขั้วไฟฟ้า อัตราส่วนขั้วไฟฟ้าแคโทดต่อแอโนด เท่ากับ 2

Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power Density (mW/m ²)
1	157.48	0.16	0.025	3149.57	495.99
2	154.43	0.15	0.024	3088.55	476.96
3	151.59	0.15	0.023	3031.86	459.61
4	148.94	0.15	0.022	2978.88	443.69
5	146.44	0.15	0.021	2928.72	428.87
6	144.07	0.14	0.021	2881.37	415.11
7	141.83	0.14	0.020	2836.63	402.32
8	139.66	0.14	0.020	2793.12	390.08
9	137.01	0.14	0.019	2740.25	375.45
10	134.15	0.13	0.018	2683.01	359.93
11	131.61	0.13	0.017	2632.24	346.44
12	129.23	0.13	0.017	2584.65	334.02
13	136.50	0.14	0.019	2730.01	372.65
14	125.29	0.13	0.016	2505.88	313.97
15	123.62	0.12	0.015	2472.30	305.61
16	122.08	0.12	0.015	2441.51	298.05
17	120.65	0.12	0.015	2412.99	291.13
18	119.30	0.12	0.014	2385.93	284.63
19	118.02	0.12	0.014	2360.44	278.58
20	116.82	0.12	0.014	2336.46	272.95
21	115.70	0.12	0.013	2313.96	267.72
22	114.62	0.11	0.013	2292.37	262.75
23	113.57	0.11	0.013	2271.50	257.98
24	112.59	0.11	0.013	2251.78	253.53
25	111.69	0.11	0.012	2233.86	249.51
26	110.69	0.11	0.012	2213.89	245.07
27	109.52	0.11	0.012	2190.42	239.90
28	108.23	0.11	0.012	2164.55	234.26
29	106.95	0.11	0.011	2139.02	228.77
30	105.72	0.11	0.011	2114.43	223.54
31	104.50	0.10	0.011	2090.09	218.42
32	103.30	0.10	0.011	2066.08	213.43
33	102.13	0.10	0.010	2042.63	208.62
34	100.93	0.10	0.010	2018.53	203.72
35	99.77	0.10	0.010	1995.34	199.07
36	98.69	0.10	0.010	1973.89	194.81

Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power Density (mW/m ²)
37	97.76	0.10	0.010	1955.17	191.13
38	96.96	0.10	0.009	1939.15	188.01
39	96.23	0.10	0.009	1924.63	185.21
40	95.65	0.10	0.009	1912.97	182.97
41	95.18	0.10	0.009	1903.69	181.20
42	94.75	0.09	0.009	1895.00	179.55
43	94.41	0.09	0.009	1888.28	178.28
44	94.04	0.09	0.009	1880.85	176.88
45	93.69	0.09	0.009	1873.72	175.54
46	93.30	0.09	0.009	1866.01	174.10
47	92.94	0.09	0.009	1858.86	172.77
48	92.55	0.09	0.009	1851.04	171.32
49	92.19	0.09	0.008	1843.89	170.00
50	91.90	0.09	0.008	1838.09	168.93
51	91.61	0.09	0.008	1832.26	167.86
52	91.38	0.09	0.008	1827.56	167.00
53	91.22	0.09	0.008	1824.44	166.43
54	91.03	0.09	0.008	1820.62	165.73
55	90.77	0.09	0.008	1815.33	164.77
56	90.45	0.09	0.008	1809.05	163.63
57	89.95	0.09	0.008	1799.04	161.83
58	89.51	0.09	0.008	1790.24	160.25
59	89.00	0.09	0.008	1779.94	158.41
60	88.50	0.09	0.008	1769.95	156.64
61	88.39	0.09	0.008	1767.72	156.24
62	88.26	0.09	0.008	1765.30	155.81
63	88.05	0.09	0.008	1760.99	155.05
64	87.70	0.09	0.008	1754.09	153.84
65	87.23	0.09	0.008	1744.63	152.19
66	86.66	0.09	0.008	1733.22	150.20
67	86.26	0.09	0.007	1725.11	148.80
68	85.73	0.09	0.007	1714.55	146.98
69	85.24	0.09	0.007	1704.80	145.32
70	84.46	0.08	0.007	1689.14	142.66
71	83.70	0.08	0.007	1674.01	140.12
72	83.11	0.08	0.007	1662.19	138.14
73	82.70	0.08	0.007	1653.92	136.77
74	82.36	0.08	0.007	1647.25	135.67

Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power Density (mW/m ²)
75	82.03	0.08	0.007	1640.69	134.59
76	81.73	0.08	0.007	1634.67	133.61
77	81.45	0.08	0.007	1628.95	132.67
78	81.16	0.08	0.007	1623.19	131.74
79	80.80	0.08	0.007	1616.06	130.58
80	80.41	0.08	0.006	1608.13	129.30
81	79.98	0.08	0.006	1599.66	127.95
82	79.55	0.08	0.006	1591.07	126.58
83	79.12	0.08	0.006	1582.33	125.19
84	78.56	0.08	0.006	1571.20	123.43
85	77.99	0.08	0.006	1559.73	121.64
86	77.45	0.08	0.006	1548.91	119.96
87	76.92	0.08	0.006	1538.35	118.33
88	76.38	0.08	0.006	1527.60	116.68
89	75.84	0.08	0.006	1516.88	115.05
90	75.28	0.08	0.006	1505.59	113.34
91	74.72	0.07	0.006	1494.32	111.65
92	74.11	0.07	0.005	1482.26	109.85
93	73.50	0.07	0.005	1469.99	108.04
94	72.91	0.07	0.005	1458.14	106.31
95	72.36	0.07	0.005	1447.27	104.73
96	71.80	0.07	0.005	1436.07	103.11
97	71.24	0.07	0.005	1424.72	101.49
98	70.74	0.07	0.005	1414.82	100.09
99	70.31	0.07	0.005	1406.17	98.87
100	69.93	0.07	0.005	1398.54	97.80
101	69.60	0.07	0.005	1391.93	96.87
102	69.35	0.07	0.005	1386.94	96.18
103	69.18	0.07	0.005	1383.54	95.71
104	69.09	0.07	0.005	1381.78	95.47
105	69.50	0.07	0.005	1390.01	96.61
106	70.86	0.07	0.005	1417.15	100.42
107	72.64	0.07	0.005	1452.90	105.55
108	74.35	0.07	0.006	1486.94	110.55
109	75.88	0.08	0.006	1517.56	115.15
110	77.20	0.08	0.006	1544.09	119.21
111	78.42	0.08	0.006	1568.41	123.00
112	79.55	0.08	0.006	1590.95	126.56

Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power Density (mW/m ²)
113	80.60	0.08	0.006	1611.95	129.92
114	81.88	0.08	0.007	1637.61	134.09
115	83.02	0.08	0.007	1660.45	137.85
116	83.91	0.08	0.007	1678.28	140.83
117	84.72	0.08	0.007	1694.41	143.55
118	66.48	0.07	0.004	1329.65	88.40
119	26.99	0.03	0.001	539.71	14.56
120	26.99	0.03	0.001	539.71	14.56
121	17.90	0.02	0.000	357.98	6.41
122	17.72	0.02	0.000	354.31	6.28
123	17.03	0.02	0.000	340.53	5.80
124	16.36	0.02	0.000	327.12	5.35
125	15.57	0.02	0.000	311.41	4.85
126	14.95	0.01	0.000	298.94	4.47
127	14.62	0.01	0.000	292.32	4.27
128	14.24	0.01	0.000	284.90	4.06
129	13.77	0.01	0.000	275.46	3.79
130	13.28	0.01	0.000	265.68	3.53
131	13.04	0.01	0.000	260.77	3.40
132	12.71	0.01	0.000	254.29	3.23
133	12.41	0.01	0.000	248.25	3.08
134	12.09	0.01	0.000	241.83	2.92
135	11.98	0.01	0.000	239.53	2.87
136	12.00	0.01	0.000	239.99	2.88
137	11.82	0.01	0.000	236.46	2.80
138	11.58	0.01	0.000	231.60	2.68
139	11.30	0.01	0.000	225.90	2.55
140	11.26	0.01	0.000	225.28	2.54
141	11.54	0.01	0.000	230.86	2.66
142	11.67	0.01	0.000	233.30	2.72
143	11.73	0.01	0.000	234.67	2.75
144	11.90	0.01	0.000	238.08	2.83
145	12.29	0.01	0.000	245.77	3.02
146	13.00	0.01	0.000	259.95	3.38
147	13.61	0.01	0.000	272.25	3.71
148	14.37	0.01	0.000	287.49	4.13
149	14.78	0.01	0.000	295.55	4.37
150	15.15	0.02	0.000	303.00	4.59

Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power Density (mW/m ²)
151	15.67	0.02	0.000	313.41	4.91
152	15.88	0.02	0.000	317.60	5.04
153	16.09	0.02	0.000	321.85	5.18
154	16.03	0.02	0.000	320.59	5.14
155	15.87	0.02	0.000	317.33	5.03
156	15.53	0.02	0.000	310.63	4.82
157	15.24	0.02	0.000	304.85	4.65
158	15.10	0.02	0.000	302.09	4.56
159	8.91	0.01	0.000	178.14	1.59
160	14.68	0.01	0.000	293.68	4.31
161	14.63	0.01	0.000	292.59	4.28
162	14.39	0.01	0.000	287.74	4.14
163	14.02	0.01	0.000	280.36	3.93
164	13.61	0.01	0.000	272.11	3.70
165	12.93	0.01	0.000	258.56	3.34
166	12.58	0.01	0.000	251.52	3.16
167	12.37	0.01	0.000	247.32	3.06
168	12.10	0.01	0.000	241.99	2.93
169	11.83	0.01	0.000	236.59	2.80
170	11.17	0.01	0.000	223.38	2.49
171	10.77	0.01	0.000	215.32	2.32
172	10.66	0.01	0.000	213.16	2.27
173	10.75	0.01	0.000	215.09	2.31
174	10.77	0.01	0.000	215.45	2.32
175	10.59	0.01	0.000	211.81	2.24
176	10.76	0.01	0.000	215.10	2.31
177	11.06	0.01	0.000	221.20	2.45
178	11.08	0.01	0.000	221.67	2.46
179	11.30	0.01	0.000	225.99	2.55
180	11.33	0.01	0.000	226.64	2.57
181	11.38	0.01	0.000	227.70	2.59
182	11.39	0.01	0.000	227.82	2.60
183	11.44	0.01	0.000	228.77	2.62
184	11.48	0.01	0.000	229.51	2.63
185	11.53	0.01	0.000	230.69	2.66
186	11.34	0.01	0.000	226.76	2.57
187	10.90	0.01	0.000	218.04	2.38
188	10.67	0.01	0.000	213.34	2.28

Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power Density (mW/m ²)
189	10.54	0.01	0.000	210.84	2.22
190	10.51	0.01	0.000	210.17	2.21
191	10.44	0.01	0.000	208.72	2.18
192	10.19	0.01	0.000	203.79	2.08
193	9.97	0.01	0.000	199.48	1.99
194	9.78	0.01	0.000	195.60	1.91
195	9.51	0.01	0.000	190.12	1.81
196	9.27	0.01	0.000	185.45	1.72
197	8.83	0.01	0.000	176.61	1.56
198	8.41	0.01	0.000	168.10	1.41
199	8.14	0.01	0.000	162.82	1.33
200	8.08	0.01	0.000	161.67	1.31
201	8.06	0.01	0.000	161.15	1.30
202	7.93	0.01	0.000	158.58	1.26
203	7.86	0.01	0.000	157.17	1.24
204	7.72	0.01	0.000	154.48	1.19
205	7.64	0.01	0.000	152.87	1.17
206	7.59	0.01	0.000	151.82	1.15
207	7.51	0.01	0.000	150.21	1.13
208	7.05	0.01	0.000	140.99	0.99
209	6.81	0.01	0.000	136.13	0.93
210	6.79	0.01	0.000	135.77	0.92
211	6.70	0.01	0.000	133.96	0.90
212	6.70	0.01	0.000	133.99	0.90
213	6.65	0.01	0.000	133.00	0.88
214	6.61	0.01	0.000	132.18	0.87
215	6.49	0.01	0.000	129.82	0.84
216	6.36	0.01	0.000	127.21	0.81
217	6.27	0.01	0.000	125.48	0.79
218	6.62	0.01	0.000	132.37	0.88
219	6.87	0.01	0.000	137.39	0.94
220	6.89	0.01	0.000	137.76	0.95
221	6.87	0.01	0.000	137.36	0.94
222	6.77	0.01	0.000	135.43	0.92
223	6.61	0.01	0.000	132.27	0.87
224	6.44	0.01	0.000	128.79	0.83
225	6.25	0.01	0.000	125.08	0.78
226	6.07	0.01	0.000	121.48	0.74

Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ³)	Power Density (mW/m ³)
227	5.89	0.01	0.000	117.88	0.69
228	5.70	0.01	0.000	113.98	0.65
229	5.54	0.01	0.000	110.83	0.61
230	5.46	0.01	0.000	109.26	0.60
231	5.26	0.01	0.000	105.11	0.55
232	5.14	0.01	0.000	102.86	0.53
233	5.01	0.01	0.000	100.16	0.50
234	4.88	0.00	0.000	97.69	0.48
235	4.86	0.00	0.000	97.20	0.47
236	4.76	0.00	0.000	95.19	0.45
237	4.70	0.00	0.000	93.94	0.44
238	4.67	0.00	0.000	93.33	0.44
239	4.62	0.00	0.000	92.41	0.43
240	4.62	0.00	0.000	92.41	0.43

ตารางที่ 7 ผลการทดลองขนาดของขั้วไฟฟ้า อัตราส่วนขั้วไฟฟ้าแคโทดต่อแอโนด เท่ากับ 4

Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ³)	Power Density (mW/m ³)
1	57.27	0.06	0.003	1145.34	65.59
2	57.10	0.06	0.003	1141.92	65.20
3	56.91	0.06	0.003	1138.25	64.78
4	56.68	0.06	0.003	1133.57	64.25
5	56.38	0.06	0.003	1127.64	63.58
6	56.06	0.06	0.003	1121.24	62.86
7	55.86	0.06	0.003	1117.25	62.41
8	55.64	0.06	0.003	1112.78	61.91
9	55.44	0.06	0.003	1108.85	61.48
10	55.24	0.06	0.003	1104.77	61.03
11	54.96	0.05	0.003	1099.26	60.42
12	54.70	0.05	0.003	1093.94	59.84
13	55.39	0.06	0.003	1107.76	61.36
14	54.41	0.05	0.003	1088.18	59.21
15	54.29	0.05	0.003	1085.72	58.94
16	54.16	0.05	0.003	1083.26	58.67
17	54.04	0.05	0.003	1080.73	58.40
18	53.78	0.05	0.003	1075.57	57.84

Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ³)	Power Density (mW/m ³)
19	53.52	0.05	0.003	1070.34	57.28
20	53.21	0.05	0.003	1064.25	56.63
21	52.89	0.05	0.003	1057.71	55.94
22	52.53	0.05	0.003	1050.68	55.20
23	52.10	0.05	0.003	1041.95	54.28
24	51.62	0.05	0.003	1032.37	53.29
25	51.30	0.05	0.003	1025.98	52.63
26	51.00	0.05	0.003	1019.97	52.02
27	50.69	0.05	0.003	1013.74	51.38
28	50.45	0.05	0.003	1009.05	50.91
29	50.26	0.05	0.003	1005.27	50.53
30	50.03	0.05	0.003	1000.70	50.07
31	49.87	0.05	0.002	997.42	49.74
32	49.70	0.05	0.002	993.94	49.40
33	49.52	0.05	0.002	990.38	49.04
34	49.36	0.05	0.002	987.25	48.73
35	49.35	0.05	0.002	987.05	48.71
36	49.37	0.05	0.002	987.34	48.74
37	49.41	0.05	0.002	988.15	48.82
38	49.52	0.05	0.002	990.44	49.05
39	49.67	0.05	0.002	993.35	49.34
40	49.86	0.05	0.002	997.23	49.72
41	50.08	0.05	0.003	1001.62	50.16
42	50.27	0.05	0.003	1005.36	50.54
43	50.53	0.05	0.003	1010.54	51.06
44	50.72	0.05	0.003	1014.35	51.44
45	50.90	0.05	0.003	1017.92	51.81
46	51.13	0.05	0.003	1022.59	52.28
47	51.33	0.05	0.003	1026.57	52.69
48	51.46	0.05	0.003	1029.14	52.96
49	51.59	0.05	0.003	1031.82	53.23
50	51.72	0.05	0.003	1034.42	53.50
51	51.81	0.05	0.003	1036.24	53.69
52	51.89	0.05	0.003	1037.77	53.85
53	51.94	0.05	0.003	1038.83	53.96
54	51.98	0.05	0.003	1039.68	54.05
55	51.98	0.05	0.003	1039.67	54.05
56	51.96	0.05	0.003	1039.16	53.99

Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ³)	Power Density (mW/m ³)
57	51.73	0.05	0.003	1034.59	53.52
58	51.62	0.05	0.003	1032.38	53.29
59	51.66	0.05	0.003	1033.14	53.37
60	51.62	0.05	0.003	1032.43	53.30
61	51.71	0.05	0.003	1034.14	53.47
62	51.79	0.05	0.003	1035.79	53.64
63	51.84	0.05	0.003	1036.87	53.75
64	51.84	0.05	0.003	1036.82	53.75
65	51.78	0.05	0.003	1035.60	53.62
66	51.65	0.05	0.003	1033.05	53.36
67	51.75	0.05	0.003	1035.01	53.56
68	51.76	0.05	0.003	1035.19	53.58
69	51.83	0.05	0.003	1036.56	53.72
70	51.83	0.05	0.003	1036.59	53.73
71	51.77	0.05	0.003	1035.48	53.61
72	51.75	0.05	0.003	1034.91	53.55
73	51.76	0.05	0.003	1035.10	53.57
74	51.77	0.05	0.003	1035.49	53.61
75	51.79	0.05	0.003	1035.83	53.65
76	51.81	0.05	0.003	1036.14	53.68
77	51.82	0.05	0.003	1036.44	53.71
78	51.84	0.05	0.003	1036.83	53.75
79	51.80	0.05	0.003	1035.97	53.66
80	51.61	0.05	0.003	1032.28	53.28
81	50.47	0.05	0.003	1009.47	50.95
82	49.93	0.05	0.002	998.52	49.85
83	49.57	0.05	0.002	991.45	49.15
84	49.38	0.05	0.002	987.59	48.77
85	49.02	0.05	0.002	980.45	48.06
86	48.46	0.05	0.002	969.14	46.96
87	47.25	0.05	0.002	945.06	44.66
88	42.90	0.04	0.002	857.95	36.80
89	40.08	0.04	0.002	801.54	32.12
90	38.57	0.04	0.001	771.40	29.75
91	37.70	0.04	0.001	754.00	28.43
92	37.11	0.04	0.001	742.23	27.55
93	36.74	0.04	0.001	734.86	27.00
94	36.42	0.04	0.001	728.43	26.53

Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power Density (mW/m ²)
95	36.15	0.04	0.001	722.95	26.13
96	35.86	0.04	0.001	717.19	25.72
97	35.57	0.04	0.001	711.38	25.30
98	35.35	0.04	0.001	707.09	25.00
99	35.08	0.04	0.001	701.56	24.61
100	34.84	0.03	0.001	696.84	24.28
101	34.66	0.03	0.001	693.10	24.02
102	34.53	0.03	0.001	690.57	23.84
103	34.38	0.03	0.001	687.64	23.64
104	34.30	0.03	0.001	686.06	23.53
105	34.14	0.03	0.001	682.85	23.31
106	34.03	0.03	0.001	680.54	23.16
107	34.01	0.03	0.001	680.26	23.14
108	33.98	0.03	0.001	679.67	23.10
109	33.96	0.03	0.001	679.17	23.06
110	33.95	0.03	0.001	679.09	23.06
111	33.96	0.03	0.001	679.22	23.07
112	33.95	0.03	0.001	678.95	23.05
113	33.89	0.03	0.001	677.77	22.97
114	33.87	0.03	0.001	677.45	22.95
115	33.83	0.03	0.001	676.64	22.89
116	33.81	0.03	0.001	676.10	22.86
117	33.68	0.03	0.001	673.66	22.69
118	25.77	0.03	0.001	515.30	13.28
119	6.55	0.01	0.000	131.01	0.86
120	6.55	0.01	0.000	131.01	0.86
121	4.01	0.00	0.000	80.25	0.32
122	3.65	0.00	0.000	73.07	0.27
123	3.19	0.00	0.000	63.71	0.20
124	2.74	0.00	0.000	54.81	0.15
125	2.38	0.00	0.000	47.67	0.11
126	2.08	0.00	0.000	41.67	0.09
127	1.88	0.00	0.000	37.69	0.07
128	1.82	0.00	0.000	36.42	0.07
129	1.74	0.00	0.000	34.72	0.06
130	1.71	0.00	0.000	34.24	0.06
131	1.56	0.00	0.000	31.29	0.05
132	1.48	0.00	0.000	29.70	0.04

Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ³)	Power Density (mW/m ³)
133	1.35	0.00	0.000	27.07	0.04
134	1.28	0.00	0.000	25.52	0.03
135	1.23	0.00	0.000	24.56	0.03
136	1.10	0.00	0.000	22.02	0.02
137	0.98	0.00	0.000	19.66	0.02
138	0.95	0.00	0.000	19.00	0.02
139	0.87	0.00	0.000	17.49	0.02
140	0.90	0.00	0.000	17.97	0.02
141	1.10	0.00	0.000	21.92	0.02
142	1.14	0.00	0.000	22.87	0.03
143	1.23	0.00	0.000	24.56	0.03
144	1.55	0.00	0.000	31.09	0.05
145	2.19	0.00	0.000	43.75	0.10
146	5.16	0.01	0.000	103.15	0.53
147	5.28	0.01	0.000	105.63	0.56
148	4.75	0.00	0.000	94.92	0.45
149	5.06	0.01	0.000	101.17	0.51
150	5.62	0.01	0.000	112.41	0.63
151	6.17	0.01	0.000	123.42	0.76
152	6.92	0.01	0.000	138.35	0.96
153	7.67	0.01	0.000	153.36	1.18
154	8.35	0.01	0.000	166.97	1.39
155	9.04	0.01	0.000	180.77	1.63
156	9.88	0.01	0.000	197.65	1.95
157	10.97	0.01	0.000	219.35	2.41
158	12.16	0.01	0.000	243.25	2.96
159	15.12	0.02	0.000	302.43	4.57
160	14.07	0.01	0.000	281.48	3.96
161	15.09	0.02	0.000	301.79	4.55
162	16.43	0.02	0.000	328.65	5.40
163	17.20	0.02	0.000	343.96	5.92
164	18.03	0.02	0.000	360.64	6.50
165	21.37	0.02	0.000	427.32	9.13
166	23.50	0.02	0.001	469.98	11.04
167	26.17	0.03	0.001	523.43	13.70
168	27.98	0.03	0.001	559.55	15.65
169	27.74	0.03	0.001	554.76	15.39
170	26.16	0.03	0.001	523.14	13.68

Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power Density (mW/m ²)
171	23.83	0.02	0.001	476.63	11.36
172	21.79	0.02	0.000	435.72	9.49
173	19.89	0.02	0.000	397.87	7.91
174	19.44	0.02	0.000	388.79	7.56
175	19.13	0.02	0.000	382.60	7.32
176	19.15	0.02	0.000	383.02	7.34
177	19.98	0.02	0.000	399.52	7.98
178	20.98	0.02	0.000	419.65	8.81
179	22.19	0.02	0.000	443.88	9.85
180	23.25	0.02	0.001	464.97	10.81
181	24.28	0.02	0.001	485.66	11.79
182	25.50	0.03	0.001	510.04	13.01
183	26.67	0.03	0.001	533.31	14.22
184	27.76	0.03	0.001	555.17	15.41
185	28.51	0.03	0.001	570.26	16.26
186	28.73	0.03	0.001	574.60	16.51
187	28.73	0.03	0.001	574.54	16.50
188	28.56	0.03	0.001	571.10	16.31
189	27.78	0.03	0.001	555.65	15.44
190	26.20	0.03	0.001	524.08	13.73
191	24.21	0.02	0.001	484.12	11.72
192	22.33	0.02	0.000	446.56	9.97
193	20.59	0.02	0.000	411.89	8.48
194	19.09	0.02	0.000	381.75	7.29
195	17.44	0.02	0.000	348.74	6.08
196	16.05	0.02	0.000	320.96	5.15
197	14.81	0.01	0.000	296.26	4.39
198	13.49	0.01	0.000	269.83	3.64
199	12.37	0.01	0.000	247.41	3.06
200	11.56	0.01	0.000	231.11	2.67
201	10.92	0.01	0.000	218.42	2.39
202	10.36	0.01	0.000	207.13	2.15
203	9.92	0.01	0.000	198.44	1.97
204	9.54	0.01	0.000	190.88	1.82
205	9.35	0.01	0.000	186.90	1.75
206	9.28	0.01	0.000	185.52	1.72
207	9.28	0.01	0.000	185.62	1.72
208	9.20	0.01	0.000	183.90	1.69

Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ³)	Power Density (mW/m ³)
209	9.23	0.01	0.000	184.59	1.70
210	9.26	0.01	0.000	185.25	1.72
211	9.23	0.01	0.000	184.61	1.70
212	9.24	0.01	0.000	184.73	1.71
213	9.20	0.01	0.000	184.06	1.69
214	9.17	0.01	0.000	183.41	1.68
215	9.13	0.01	0.000	182.69	1.67
216	9.06	0.01	0.000	181.20	1.64
217	8.97	0.01	0.000	179.37	1.61
218	8.92	0.01	0.000	178.42	1.59
219	8.79	0.01	0.000	175.80	1.55
220	8.63	0.01	0.000	172.63	1.49
221	8.48	0.01	0.000	169.51	1.44
222	8.30	0.01	0.000	165.98	1.38
223	8.11	0.01	0.000	162.17	1.32
224	7.92	0.01	0.000	158.50	1.26
225	7.74	0.01	0.000	154.72	1.20
226	7.52	0.01	0.000	150.49	1.13
227	7.31	0.01	0.000	146.25	1.07
228	7.09	0.01	0.000	141.79	1.01
229	6.87	0.01	0.000	137.40	0.94
230	6.69	0.01	0.000	133.74	0.89
231	6.49	0.01	0.000	129.83	0.84
232	6.32	0.01	0.000	126.33	0.80
233	6.16	0.01	0.000	123.26	0.76
234	6.06	0.01	0.000	121.17	0.73
235	5.98	0.01	0.000	119.62	0.72
236	5.90	0.01	0.000	118.06	0.70
237	5.92	0.01	0.000	118.35	0.70
238	6.03	0.01	0.000	120.54	0.73
239	6.08	0.01	0.000	121.69	0.74
240	6.08	0.01	0.000	121.69	0.74

การทดลองที่ 1.3 ผลการทดลองขนาดของขั้วไฟฟ้า

ตารางที่ 1 ผลการทดลองวัสดุของขั้วไฟฟ้า แผ่นแกรไฟต์กับแผ่นแกรไฟต์ (แคโทด : แอโนด)

Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power Density (mW/m ²)
1	431.53	0.20	0.085	3923.03	1692.92
2	335.88	0.15	0.051	3053.47	1025.60
3	289.75	0.13	0.038	2634.11	763.24
4	258.51	0.12	0.030	2350.09	607.52
5	234.84	0.11	0.025	2134.92	501.37
6	215.79	0.10	0.021	1961.76	423.33
7	199.96	0.09	0.018	1817.83	363.50
8	186.58	0.08	0.016	1696.14	316.46
9	175.07	0.08	0.014	1591.52	278.62
10	164.87	0.07	0.012	1498.83	247.12
11	156.11	0.07	0.011	1419.17	221.54
12	148.37	0.07	0.010	1348.77	200.11
13	141.53	0.06	0.009	1286.61	182.09
14	135.45	0.06	0.008	1231.39	166.80
15	129.97	0.06	0.008	1181.58	153.57
16	125.04	0.06	0.007	1136.70	142.13
17	120.65	0.05	0.007	1096.82	132.33
18	116.58	0.05	0.006	1059.79	123.55
19	113.06	0.05	0.006	1027.79	116.20
20	109.76	0.05	0.005	997.85	109.53
21	107.10	0.05	0.005	973.62	104.27
22	104.75	0.05	0.005	952.26	99.75
23	102.62	0.05	0.005	932.89	95.73
24	100.69	0.05	0.005	915.36	92.17
25	98.91	0.04	0.004	899.14	88.93
26	97.20	0.04	0.004	883.61	85.88
27	95.45	0.04	0.004	867.74	82.83
28	94.03	0.04	0.004	854.80	80.38
29	92.74	0.04	0.004	843.08	78.19
30	91.59	0.04	0.004	832.59	76.25
31	90.56	0.04	0.004	823.24	74.55
32	89.73	0.04	0.004	815.76	73.20
33	89.15	0.04	0.004	810.44	72.25
34	88.83	0.04	0.004	807.55	71.73

Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power Density (mW/m ²)
35	88.60	0.04	0.004	805.45	71.36
36	88.49	0.04	0.004	804.48	71.19
37	88.46	0.04	0.004	804.17	71.14
38	88.34	0.04	0.004	803.08	70.94
39	88.34	0.04	0.004	803.11	70.95
40	88.45	0.04	0.004	804.12	71.13
41	88.37	0.04	0.004	803.35	70.99
42	88.28	0.04	0.004	802.55	70.85
43	88.38	0.04	0.004	803.42	71.00
44	88.55	0.04	0.004	805.03	71.29
45	88.75	0.04	0.004	806.80	71.60
46	88.91	0.04	0.004	808.27	71.86
47	88.84	0.04	0.004	807.65	71.75
48	89.09	0.04	0.004	809.91	72.15
49	89.32	0.04	0.004	812.02	72.53
50	89.53	0.04	0.004	813.91	72.87
51	89.63	0.04	0.004	814.83	73.03
52	89.57	0.04	0.004	814.26	72.93
53	89.47	0.04	0.004	813.35	72.77
54	89.47	0.04	0.004	813.33	72.77
55	89.50	0.04	0.004	813.64	72.82
56	89.39	0.04	0.004	812.67	72.65
57	89.12	0.04	0.004	810.20	72.21
58	89.01	0.04	0.004	809.18	72.03
59	89.25	0.04	0.004	811.33	72.41
60	89.50	0.04	0.004	813.67	72.83
61	90.36	0.04	0.004	821.49	74.23
62	91.58	0.04	0.004	832.53	76.24
63	90.96	0.04	0.004	826.95	75.22
64	90.25	0.04	0.004	820.42	74.04
65	89.43	0.04	0.004	813.01	72.71
66	88.88	0.04	0.004	808.01	71.82
67	88.81	0.04	0.004	807.40	71.71
68	88.80	0.04	0.004	807.25	71.68
69	91.12	0.04	0.004	828.40	75.49
70	91.62	0.04	0.004	832.88	76.31
71	91.30	0.04	0.004	829.99	75.78
72	90.70	0.04	0.004	824.53	74.78

Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ³)	Power Density (mW/m ³)
73	89.91	0.04	0.004	817.33	73.48
74	87.53	0.04	0.003	795.75	69.65
75	89.36	0.04	0.004	812.41	72.60
76	89.28	0.04	0.004	811.64	72.46
77	89.04	0.04	0.004	809.45	72.07
78	90.19	0.04	0.004	819.92	73.95
79	91.96	0.04	0.004	836.02	76.88
80	94.48	0.04	0.004	858.93	81.15
81	98.43	0.04	0.004	894.77	88.07
82	102.21	0.05	0.005	929.22	94.98
83	105.83	0.05	0.005	962.08	101.82
84	112.53	0.05	0.006	1022.97	115.11
85	119.76	0.05	0.007	1088.75	130.39
86	126.17	0.06	0.007	1147.02	144.72
87	128.14	0.06	0.007	1164.91	149.27
88	127.69	0.06	0.007	1160.83	148.23
89	126.83	0.06	0.007	1152.97	146.23
90	126.42	0.06	0.007	1149.25	145.29
91	126.60	0.06	0.007	1150.92	145.71
92	126.97	0.06	0.007	1154.24	146.55
93	127.14	0.06	0.007	1155.78	146.94
94	128.32	0.06	0.007	1166.57	149.70
95	128.77	0.06	0.008	1170.65	150.75
96	129.43	0.06	0.008	1176.67	152.30
97	130.17	0.06	0.008	1183.32	154.03
98	130.49	0.06	0.008	1186.26	154.79
99	130.89	0.06	0.008	1189.88	155.74
100	130.14	0.06	0.008	1183.11	153.97
101	129.10	0.06	0.008	1173.60	151.51
102	128.51	0.06	0.008	1168.28	150.14
103	128.05	0.06	0.007	1164.07	149.06
104	128.64	0.06	0.008	1169.43	150.43
105	131.08	0.06	0.008	1191.64	156.20
106	133.75	0.06	0.008	1215.91	162.63
107	135.97	0.06	0.008	1236.10	168.08
108	138.24	0.06	0.009	1256.72	173.73
109	141.46	0.06	0.009	1286.03	181.92
110	144.04	0.07	0.009	1309.49	188.62

Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ³)	Power Density (mW/m ³)
111	147.31	0.07	0.010	1339.16	197.27
112	152.30	0.07	0.011	1384.57	210.87
113	159.23	0.07	0.012	1447.52	230.48
114	164.04	0.07	0.012	1491.28	244.63
115	164.91	0.07	0.012	1499.14	247.22
116	158.67	0.07	0.011	1442.46	228.88
117	158.10	0.07	0.011	1437.29	227.24
118	158.55	0.07	0.011	1441.36	228.53
119	161.05	0.07	0.012	1464.06	235.78
120	161.76	0.07	0.012	1470.58	237.89
121	161.56	0.07	0.012	1468.69	237.28
122	161.64	0.07	0.012	1469.47	237.53
123	162.30	0.07	0.012	1475.45	239.47
124	162.93	0.07	0.012	1481.18	241.33
125	162.28	0.07	0.012	1475.31	239.42
126	161.10	0.07	0.012	1464.56	235.94
127	161.01	0.07	0.012	1463.70	235.67
128	160.52	0.07	0.012	1459.29	234.25
129	160.23	0.07	0.012	1456.60	233.38
130	158.82	0.07	0.011	1443.83	229.31
131	158.52	0.07	0.011	1441.13	228.46
132	161.03	0.07	0.012	1463.94	235.74
133	163.48	0.07	0.012	1486.14	242.95
134	165.04	0.08	0.012	1500.35	247.61
135	167.50	0.08	0.013	1522.70	255.05
136	169.71	0.08	0.013	1542.82	261.83
137	170.78	0.08	0.013	1552.59	265.16
138	172.96	0.08	0.014	1572.39	271.96
139	174.54	0.08	0.014	1586.77	276.96
140	175.63	0.08	0.014	1596.60	280.41
141	176.65	0.08	0.014	1605.93	283.69
142	178.13	0.08	0.014	1619.39	288.47
143	183.95	0.08	0.015	1672.26	307.61
144	186.75	0.08	0.016	1697.70	317.04
145	186.62	0.08	0.016	1696.52	316.60
146	186.21	0.08	0.016	1692.86	315.23
147	186.08	0.08	0.016	1691.63	314.78
148	185.47	0.08	0.016	1686.12	312.73

Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power Density (mW/m ²)
149	184.20	0.08	0.015	1674.50	308.43
150	182.50	0.08	0.015	1659.13	302.80
151	181.51	0.08	0.015	1650.05	299.49
152	180.31	0.08	0.015	1639.20	295.57
153	179.41	0.08	0.015	1631.04	292.63
154	177.92	0.08	0.014	1617.48	287.79
155	175.62	0.08	0.014	1596.57	280.39
156	171.94	0.08	0.013	1563.10	268.76
157	167.20	0.08	0.013	1519.96	254.13
158	164.71	0.07	0.012	1497.40	246.64
159	164.62	0.07	0.012	1496.51	246.35
160	164.62	0.07	0.012	1496.59	246.38
161	164.25	0.07	0.012	1493.20	245.26
162	163.53	0.07	0.012	1486.64	243.11
163	162.77	0.07	0.012	1479.71	240.85
164	162.12	0.07	0.012	1473.81	238.93
165	161.26	0.07	0.012	1465.97	236.40
166	160.00	0.07	0.012	1454.54	232.73
167	159.27	0.07	0.012	1447.90	230.61
168	158.52	0.07	0.011	1441.09	228.44
169	156.85	0.07	0.011	1425.88	223.64
170	155.76	0.07	0.011	1415.99	220.55
171	153.97	0.07	0.011	1399.72	215.51
172	151.54	0.07	0.010	1377.66	208.77
173	149.32	0.07	0.010	1357.49	202.70
174	147.00	0.07	0.010	1336.37	196.45
175	144.10	0.07	0.009	1310.00	188.77
176	140.82	0.06	0.009	1280.16	180.27
177	137.02	0.06	0.009	1245.66	170.68
178	132.55	0.06	0.008	1204.96	159.71
179	127.91	0.06	0.007	1162.82	148.74
180	125.62	0.06	0.007	1141.97	143.45
181	124.35	0.06	0.007	1130.46	140.57
182	122.19	0.06	0.007	1110.83	135.73
183	120.30	0.05	0.007	1093.60	131.56
184	118.65	0.05	0.006	1078.60	127.97
185	117.46	0.05	0.006	1067.78	125.42
186	116.59	0.05	0.006	1059.88	123.57

Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power Density (mW/m ²)
187	115.79	0.05	0.006	1052.64	121.89
188	115.35	0.05	0.006	1048.62	120.96
189	114.87	0.05	0.006	1044.27	119.95
190	114.79	0.05	0.006	1043.52	119.78
191	115.01	0.05	0.006	1045.55	120.25
192	115.52	0.05	0.006	1050.19	121.32
193	116.33	0.05	0.006	1057.54	123.02
194	117.18	0.05	0.006	1065.29	124.83
195	118.26	0.05	0.006	1075.05	127.13
196	119.37	0.05	0.006	1085.17	129.53
197	120.35	0.05	0.007	1094.05	131.66
198	121.42	0.06	0.007	1103.79	134.02
199	122.75	0.06	0.007	1115.94	136.99
200	124.13	0.06	0.007	1128.44	140.07
201	125.37	0.06	0.007	1139.73	142.89
202	126.11	0.06	0.007	1146.46	144.58
203	126.83	0.06	0.007	1152.99	146.23
204	127.57	0.06	0.007	1159.77	147.96
205	129.37	0.06	0.008	1176.08	152.15
206	130.56	0.06	0.008	1186.92	154.97
207	130.49	0.06	0.008	1186.29	154.80
208	130.47	0.06	0.008	1186.06	154.74
209	130.13	0.06	0.008	1182.97	153.94
210	129.65	0.06	0.008	1178.62	152.81
211	129.04	0.06	0.008	1173.11	151.38
212	128.51	0.06	0.008	1168.26	150.13
213	128.04	0.06	0.007	1164.04	149.05
214	127.60	0.06	0.007	1159.98	148.01
215	127.10	0.06	0.007	1155.44	146.85
216	126.61	0.06	0.007	1150.98	145.72
217	126.14	0.06	0.007	1146.77	144.66
218	125.37	0.06	0.007	1139.70	142.88
219	124.54	0.06	0.007	1132.22	141.01
220	124.06	0.06	0.007	1127.84	139.92
221	123.47	0.06	0.007	1122.41	138.58
222	122.99	0.06	0.007	1118.08	137.51
223	122.29	0.06	0.007	1111.69	135.94
224	121.57	0.06	0.007	1105.17	134.36

Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ³)	Power Density (mW/m ³)
225	120.74	0.05	0.007	1097.63	132.53
226	118.62	0.05	0.006	1078.38	127.92
227	116.99	0.05	0.006	1063.58	124.43
228	116.47	0.05	0.006	1058.82	123.32
229	115.88	0.05	0.006	1053.48	122.08
230	115.25	0.05	0.006	1047.71	120.75
231	114.94	0.05	0.006	1044.91	120.10
232	117.43	0.05	0.006	1067.53	125.36
233	115.14	0.05	0.006	1046.77	120.53
234	113.80	0.05	0.006	1034.58	117.74
235	113.29	0.05	0.006	1029.93	116.68
236	114.18	0.05	0.006	1038.04	118.53
237	115.77	0.05	0.006	1052.50	121.85
238	116.39	0.05	0.006	1058.06	123.14
239	117.71	0.05	0.006	1070.06	125.95
240	118.60	0.05	0.006	1078.20	127.88

ตารางที่ 2 ผลการทดลองวัสดุของขั้วไฟฟ้า ผ้าคาร์บอนกับผ้าคาร์บอน (แคโทด : แอโนด)

Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ³)	Power Density (mW/m ³)
1	510.31	0.15	0.079	3092.78	1578.27
2	385.05	0.12	0.045	2333.66	898.58
3	326.10	0.10	0.032	1976.34	644.48
4	290.30	0.09	0.026	1759.41	510.76
5	269.15	0.08	0.022	1631.18	439.02
6	255.78	0.08	0.020	1550.18	396.51
7	246.46	0.07	0.018	1493.72	368.15
8	239.89	0.07	0.017	1453.88	348.77
9	235.10	0.07	0.017	1424.84	334.98
10	231.43	0.07	0.016	1402.63	324.61
11	228.44	0.07	0.016	1384.47	316.27
12	226.25	0.07	0.016	1371.23	310.25
13	224.73	0.07	0.015	1361.98	306.07
14	223.41	0.07	0.015	1354.02	302.51
15	222.21	0.07	0.015	1346.71	299.25
16	221.18	0.07	0.015	1340.51	296.50

Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ³)	Power Density (mW/m ³)
17	220.47	0.07	0.015	1336.19	294.59
18	219.78	0.07	0.015	1332.02	292.76
19	219.24	0.07	0.015	1328.70	291.30
20	218.71	0.07	0.014	1325.51	289.90
21	218.46	0.07	0.014	1324.02	289.25
22	217.62	0.07	0.014	1318.92	287.03
23	217.16	0.07	0.014	1316.14	285.82
24	216.75	0.07	0.014	1313.65	284.74
25	216.36	0.07	0.014	1311.24	283.69
26	215.91	0.07	0.014	1308.57	282.54
27	215.69	0.07	0.014	1307.19	281.94
28	215.71	0.07	0.014	1307.31	282.00
29	215.47	0.07	0.014	1305.86	281.37
30	215.26	0.07	0.014	1304.58	280.82
31	215.00	0.07	0.014	1303.01	280.14
32	214.88	0.07	0.014	1302.32	279.85
33	214.94	0.07	0.014	1302.66	279.99
34	214.60	0.07	0.014	1300.59	279.10
35	214.38	0.06	0.014	1299.25	278.53
36	214.35	0.06	0.014	1299.10	278.46
37	214.17	0.06	0.014	1297.97	277.98
38	214.01	0.06	0.014	1297.00	277.56
39	213.90	0.06	0.014	1296.33	277.28
40	213.67	0.06	0.014	1294.94	276.68
41	213.70	0.06	0.014	1295.17	276.78
42	213.85	0.06	0.014	1296.03	277.15
43	214.02	0.06	0.014	1297.09	277.60
44	214.28	0.06	0.014	1298.68	278.28
45	214.34	0.06	0.014	1299.00	278.42
46	214.13	0.06	0.014	1297.73	277.88
47	213.92	0.06	0.014	1296.46	277.34
48	213.65	0.06	0.014	1294.83	276.64
49	213.40	0.06	0.014	1293.35	276.01
50	213.37	0.06	0.014	1293.14	275.92
51	213.11	0.06	0.014	1291.59	275.25
52	213.00	0.06	0.014	1290.92	274.97
53	212.96	0.06	0.014	1290.67	274.86
54	212.94	0.06	0.014	1290.52	274.80

Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power Density (mW/m ²)
55	212.38	0.06	0.014	1287.16	273.37
56	212.00	0.06	0.014	1284.87	272.40
57	211.89	0.06	0.014	1284.17	272.10
58	212.27	0.06	0.014	1286.47	273.08
59	212.28	0.06	0.014	1286.52	273.10
60	211.71	0.06	0.014	1283.12	271.65
61	205.54	0.06	0.013	1245.72	256.05
62	201.46	0.06	0.012	1220.95	245.97
63	199.16	0.06	0.012	1207.04	240.40
64	197.59	0.06	0.012	1197.50	236.61
65	195.98	0.06	0.012	1187.78	232.78
66	194.43	0.06	0.011	1178.38	229.12
67	193.18	0.06	0.011	1170.79	226.17
68	191.57	0.06	0.011	1161.03	222.42
69	188.94	0.06	0.011	1145.08	216.35
70	186.31	0.06	0.011	1129.14	210.37
71	184.26	0.06	0.010	1116.73	205.77
72	182.89	0.06	0.010	1108.42	202.72
73	180.35	0.05	0.010	1093.00	197.12
74	175.41	0.05	0.009	1063.07	186.47
75	175.37	0.05	0.009	1062.86	186.40
76	175.37	0.05	0.009	1062.84	186.39
77	175.80	0.05	0.009	1065.43	187.30
78	178.15	0.05	0.010	1079.67	192.34
79	181.54	0.06	0.010	1100.26	199.74
80	184.79	0.06	0.010	1119.94	206.95
81	188.24	0.06	0.011	1140.83	214.75
82	190.75	0.06	0.011	1156.06	220.52
83	192.18	0.06	0.011	1164.75	223.85
84	193.23	0.06	0.011	1171.09	226.29
85	192.51	0.06	0.011	1166.73	224.61
86	190.47	0.06	0.011	1154.36	219.87
87	188.47	0.06	0.011	1142.21	215.27
88	185.82	0.06	0.010	1126.18	209.27
89	182.93	0.06	0.010	1108.69	202.82
90	180.36	0.05	0.010	1093.09	197.15
91	178.55	0.05	0.010	1082.11	193.21
92	176.49	0.05	0.009	1069.63	188.78

Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power Density (mW/m ²)
93	173.89	0.05	0.009	1053.86	183.25
94	172.41	0.05	0.009	1044.88	180.14
95	169.93	0.05	0.009	1029.87	175.00
96	168.92	0.05	0.009	1023.75	172.93
97	168.14	0.05	0.009	1019.05	171.35
98	166.58	0.05	0.008	1009.60	168.18
99	165.47	0.05	0.008	1002.83	165.93
100	162.29	0.05	0.008	983.55	159.62
101	158.49	0.05	0.008	960.57	152.24
102	156.47	0.05	0.007	948.30	148.38
103	155.16	0.05	0.007	940.37	145.91
104	155.68	0.05	0.007	943.54	146.89
105	159.34	0.05	0.008	965.68	153.87
106	162.71	0.05	0.008	986.10	160.45
107	164.67	0.05	0.008	998.02	164.35
108	166.59	0.05	0.008	1009.61	168.19
109	168.45	0.05	0.009	1020.92	171.97
110	169.51	0.05	0.009	1027.31	174.13
111	170.61	0.05	0.009	1033.99	176.41
112	169.73	0.05	0.009	1028.67	174.60
113	167.89	0.05	0.009	1017.53	170.84
114	165.91	0.05	0.008	1005.52	166.83
115	163.67	0.05	0.008	991.91	162.34
116	161.25	0.05	0.008	977.28	157.59
117	159.42	0.05	0.008	966.16	154.02
118	156.91	0.05	0.007	950.94	149.21
119	155.66	0.05	0.007	943.40	146.85
120	154.05	0.05	0.007	933.65	143.83
121	151.72	0.05	0.007	919.53	139.51
122	149.28	0.05	0.007	904.75	135.06
123	147.97	0.04	0.007	896.77	132.69
124	147.23	0.04	0.007	892.32	131.38
125	145.50	0.04	0.006	881.82	128.30
126	143.76	0.04	0.006	871.27	125.25
127	141.69	0.04	0.006	858.70	121.66
128	140.19	0.04	0.006	849.62	119.10
129	139.41	0.04	0.006	844.92	117.79
130	137.20	0.04	0.006	831.52	114.08

Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power Density (mW/m ²)
131	137.31	0.04	0.006	832.18	114.27
132	140.27	0.04	0.006	850.09	119.24
133	143.38	0.04	0.006	868.95	124.59
134	145.74	0.04	0.006	883.25	128.72
135	147.57	0.04	0.007	894.39	131.99
136	149.56	0.05	0.007	906.45	135.57
137	151.48	0.05	0.007	918.06	139.07
138	153.11	0.05	0.007	927.91	142.07
139	154.46	0.05	0.007	936.11	144.59
140	155.24	0.05	0.007	940.87	146.06
141	155.90	0.05	0.007	944.87	147.31
142	155.55	0.05	0.007	942.75	146.65
143	154.75	0.05	0.007	937.85	145.13
144	153.96	0.05	0.007	933.08	143.66
145	153.10	0.05	0.007	927.85	142.05
146	151.91	0.05	0.007	920.64	139.85
147	151.36	0.05	0.007	917.35	138.85
148	150.10	0.05	0.007	909.68	136.54
149	148.24	0.04	0.007	898.45	133.19
150	145.90	0.04	0.006	884.25	129.01
151	144.59	0.04	0.006	876.31	126.71
152	143.46	0.04	0.006	869.45	124.73
153	142.73	0.04	0.006	865.01	123.46
154	141.43	0.04	0.006	857.16	121.23
155	140.07	0.04	0.006	848.90	118.90
156	138.47	0.04	0.006	839.19	116.20
157	138.09	0.04	0.006	836.92	115.57
158	139.69	0.04	0.006	846.59	118.26
159	142.88	0.04	0.006	865.93	123.72
160	146.16	0.04	0.006	885.84	129.48
161	148.96	0.05	0.007	902.81	134.49
162	151.56	0.05	0.007	918.53	139.21
163	154.73	0.05	0.007	937.78	145.11
164	157.36	0.05	0.008	953.68	150.07
165	160.04	0.05	0.008	969.94	155.23
166	161.80	0.05	0.008	980.63	158.67
167	162.46	0.05	0.008	984.62	159.96
168	163.24	0.05	0.008	989.32	161.49

Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power Density (mW/m ²)
169	163.78	0.05	0.008	992.59	162.56
170	163.94	0.05	0.008	993.57	162.88
171	164.09	0.05	0.008	994.50	163.19
172	164.14	0.05	0.008	994.78	163.28
173	163.83	0.05	0.008	992.93	162.67
174	164.04	0.05	0.008	994.17	163.08
175	163.16	0.05	0.008	988.85	161.34
176	162.37	0.05	0.008	984.09	159.79
177	161.47	0.05	0.008	978.59	158.01
178	160.52	0.05	0.008	972.85	156.16
179	160.13	0.05	0.008	970.46	155.40
180	159.69	0.05	0.008	967.84	154.56
181	159.49	0.05	0.008	966.58	154.15
182	159.19	0.05	0.008	964.78	153.58
183	158.98	0.05	0.008	963.52	153.18
184	158.45	0.05	0.008	960.33	152.17
185	158.32	0.05	0.008	959.51	151.91
186	158.42	0.05	0.008	960.11	152.10
187	158.80	0.05	0.008	962.45	152.84
188	159.12	0.05	0.008	964.33	153.44
189	158.98	0.05	0.008	963.53	153.18
190	159.41	0.05	0.008	966.12	154.01
191	160.50	0.05	0.008	972.73	156.13
192	162.58	0.05	0.008	985.32	160.19
193	164.76	0.05	0.008	998.55	164.52
194	166.31	0.05	0.008	1007.93	167.63
195	168.46	0.05	0.009	1020.95	171.99
196	170.81	0.05	0.009	1035.23	176.83
197	172.16	0.05	0.009	1043.41	179.64
198	173.56	0.05	0.009	1051.88	182.56
199	176.01	0.05	0.009	1066.75	187.76
200	178.08	0.05	0.010	1079.26	192.19
201	179.68	0.05	0.010	1088.95	195.66
202	180.77	0.05	0.010	1095.60	198.05
203	181.98	0.06	0.010	1102.91	200.71
204	182.94	0.06	0.010	1108.71	202.82
205	184.20	0.06	0.010	1116.37	205.64
206	185.37	0.06	0.010	1123.48	208.26

Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ³)	Power Density (mW/m ³)
207	186.71	0.06	0.011	1131.60	211.28
208	187.58	0.06	0.011	1136.84	213.25
209	188.25	0.06	0.011	1140.91	214.77
210	188.91	0.06	0.011	1144.92	216.29
211	189.72	0.06	0.011	1149.84	218.15
212	190.64	0.06	0.011	1155.41	220.27
213	191.85	0.06	0.011	1162.75	223.08
214	193.05	0.06	0.011	1169.99	225.86
215	194.31	0.06	0.011	1177.66	228.83
216	195.50	0.06	0.012	1184.85	231.64
217	196.76	0.06	0.012	1192.50	234.64
218	197.33	0.06	0.012	1195.96	236.00
219	198.28	0.06	0.012	1201.71	238.28
220	199.95	0.06	0.012	1211.81	242.30
221	201.16	0.06	0.012	1219.18	245.25
222	202.22	0.06	0.012	1225.56	247.83
223	203.17	0.06	0.013	1231.32	250.16
224	204.02	0.06	0.013	1236.48	252.27
225	203.75	0.06	0.013	1234.84	251.60
226	203.96	0.06	0.013	1236.10	252.11
227	204.88	0.06	0.013	1241.69	254.40
228	205.98	0.06	0.013	1248.39	257.15
229	207.11	0.06	0.013	1255.20	259.96
230	207.53	0.06	0.013	1257.76	261.02
231	208.01	0.06	0.013	1260.66	262.23
232	208.88	0.06	0.013	1265.91	264.42
233	209.11	0.06	0.013	1267.34	265.02
234	208.74	0.06	0.013	1265.10	264.08
235	208.68	0.06	0.013	1264.73	263.93
236	208.57	0.06	0.013	1264.04	263.64
237	209.68	0.06	0.013	1270.76	266.45
238	211.37	0.06	0.014	1281.04	270.78
239	214.24	0.06	0.014	1298.40	278.16
240	215.70	0.07	0.014	1307.25	281.97

ตารางที่ 3 ผลการทดลองวัสดุของขั้วไฟฟ้า แผ่นแกรไฟต์กับผ้าคาร์บอน (แคโทด : แอนโนด)

Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ³)	Power Density (mW/m ³)
1	386.99	0.12	0.045	2345.40	907.65
2	250.89	0.08	0.019	1520.55	381.49
3	197.78	0.06	0.012	1198.69	237.08
4	169.99	0.05	0.009	1030.22	175.12
5	155.14	0.05	0.007	940.22	145.86
6	145.93	0.04	0.006	884.39	129.06
7	139.22	0.04	0.006	843.78	117.47
8	134.65	0.04	0.005	816.06	109.88
9	132.15	0.04	0.005	800.89	105.83
10	127.97	0.04	0.005	775.58	99.25
11	125.80	0.04	0.005	762.44	95.92
12	124.49	0.04	0.005	754.45	93.92
13	122.95	0.04	0.005	745.13	91.61
14	120.94	0.04	0.004	732.95	88.64
15	116.83	0.04	0.004	708.03	82.72
16	116.60	0.04	0.004	706.65	82.39
17	115.43	0.03	0.004	699.60	80.76
18	116.27	0.04	0.004	704.68	81.93
19	115.77	0.04	0.004	701.61	81.22
20	116.30	0.04	0.004	704.82	81.97
21	112.55	0.03	0.004	682.09	76.77
22	114.38	0.03	0.004	693.20	79.29
23	114.30	0.03	0.004	692.72	79.18
24	114.38	0.03	0.004	693.20	79.29
25	113.87	0.03	0.004	690.12	78.58
26	115.41	0.03	0.004	699.45	80.72
27	113.94	0.03	0.004	690.57	78.69
28	114.26	0.03	0.004	692.47	79.12
29	114.38	0.03	0.004	693.23	79.29
30	113.83	0.03	0.004	689.89	78.53
31	114.40	0.03	0.004	693.30	79.31
32	113.89	0.03	0.004	690.26	78.62
33	113.29	0.03	0.004	686.61	77.79
34	113.24	0.03	0.004	686.29	77.71
35	112.46	0.03	0.004	681.59	76.65
36	112.31	0.03	0.004	680.66	76.44

Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ³)	Power Density (mW/m ³)
37	112.51	0.03	0.004	681.88	76.72
38	112.49	0.03	0.004	681.73	76.68
39	112.96	0.03	0.004	684.62	77.34
40	112.66	0.03	0.004	682.76	76.92
41	113.02	0.03	0.004	684.95	77.41
42	114.16	0.03	0.004	691.87	78.98
43	113.16	0.03	0.004	685.84	77.61
44	112.94	0.03	0.004	684.47	77.30
45	113.30	0.03	0.004	686.65	77.79
46	114.03	0.03	0.004	691.09	78.81
47	114.01	0.03	0.004	690.95	78.77
48	113.96	0.03	0.004	690.66	78.71
49	114.33	0.03	0.004	692.88	79.21
50	114.33	0.03	0.004	692.90	79.22
51	113.72	0.03	0.004	689.18	78.37
52	113.21	0.03	0.004	686.11	77.67
53	113.42	0.03	0.004	687.41	77.97
54	114.47	0.03	0.004	693.78	79.42
55	114.97	0.03	0.004	696.77	80.11
56	114.73	0.03	0.004	695.34	79.78
57	115.32	0.03	0.004	698.89	80.59
58	115.60	0.04	0.004	700.59	80.99
59	115.70	0.04	0.004	701.23	81.13
60	114.11	0.03	0.004	691.58	78.92
61	113.11	0.03	0.004	685.51	77.54
62	112.20	0.03	0.004	679.97	76.29
63	111.99	0.03	0.004	678.75	76.02
64	111.45	0.03	0.004	675.44	75.28
65	112.24	0.03	0.004	680.23	76.35
66	112.87	0.03	0.004	684.03	77.20
67	112.78	0.03	0.004	683.54	77.09
68	111.34	0.03	0.004	674.80	75.13
69	110.14	0.03	0.004	667.50	73.52
70	109.30	0.03	0.004	662.43	72.40
71	109.45	0.03	0.004	663.33	72.60
72	108.64	0.03	0.004	658.44	71.54
73	109.07	0.03	0.004	661.01	72.09
74	106.46	0.03	0.003	645.22	68.69

Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power Density (mW/m ²)
75	108.20	0.03	0.004	655.78	70.96
76	109.19	0.03	0.004	661.76	72.26
77	109.61	0.03	0.004	664.28	72.81
78	111.72	0.03	0.004	677.07	75.64
79	114.52	0.03	0.004	694.04	79.48
80	115.70	0.04	0.004	701.22	81.13
81	118.70	0.04	0.004	719.40	85.39
82	120.67	0.04	0.004	731.35	88.25
83	122.95	0.04	0.005	745.16	91.62
84	124.46	0.04	0.005	754.29	93.88
85	126.05	0.04	0.005	763.94	96.29
86	127.35	0.04	0.005	771.79	98.28
87	128.95	0.04	0.005	781.53	100.78
88	127.82	0.04	0.005	774.66	99.02
89	125.52	0.04	0.005	760.72	95.48
90	124.43	0.04	0.005	754.14	93.84
91	125.08	0.04	0.005	758.04	94.81
92	124.37	0.04	0.005	753.73	93.74
93	125.77	0.04	0.005	762.22	95.86
94	122.98	0.04	0.005	745.32	91.66
95	122.09	0.04	0.005	739.95	90.34
96	122.91	0.04	0.005	744.91	91.56
97	122.80	0.04	0.005	744.26	91.40
98	122.09	0.04	0.005	739.96	90.34
99	121.97	0.04	0.005	739.21	90.16
100	119.81	0.04	0.004	726.13	87.00
101	118.19	0.04	0.004	716.32	84.66
102	117.37	0.04	0.004	711.34	83.49
103	116.78	0.04	0.004	707.76	82.65
104	117.83	0.04	0.004	714.13	84.15
105	120.59	0.04	0.004	730.85	88.13
106	123.31	0.04	0.005	747.31	92.15
107	125.12	0.04	0.005	758.33	94.88
108	126.70	0.04	0.005	767.85	97.28
109	126.66	0.04	0.005	767.66	97.23
110	128.83	0.04	0.005	780.77	100.58
111	132.90	0.04	0.005	805.47	107.05
112	136.67	0.04	0.006	828.31	113.21

Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power Density (mW/m ²)
113	136.34	0.04	0.006	826.32	112.66
114	138.88	0.04	0.006	841.70	116.90
115	138.02	0.04	0.006	836.48	115.45
116	138.04	0.04	0.006	836.63	115.49
117	137.55	0.04	0.006	833.66	114.67
118	135.58	0.04	0.006	821.71	111.41
119	135.15	0.04	0.006	819.11	110.71
120	134.55	0.04	0.005	815.43	109.71
121	133.11	0.04	0.005	806.74	107.39
122	132.49	0.04	0.005	802.99	106.39
123	131.48	0.04	0.005	796.85	104.77
124	130.64	0.04	0.005	791.75	103.43
125	131.12	0.04	0.005	794.65	104.19
126	129.76	0.04	0.005	786.41	102.04
127	128.15	0.04	0.005	776.68	99.53
128	127.82	0.04	0.005	774.69	99.02
129	126.33	0.04	0.005	765.63	96.72
130	126.16	0.04	0.005	764.63	96.47
131	126.61	0.04	0.005	767.31	97.15
132	129.97	0.04	0.005	787.72	102.38
133	131.84	0.04	0.005	799.02	105.34
134	133.85	0.04	0.005	811.22	108.58
135	134.93	0.04	0.006	817.75	110.34
136	137.39	0.04	0.006	832.70	114.41
137	138.66	0.04	0.006	840.38	116.53
138	140.72	0.04	0.006	852.83	120.01
139	141.48	0.04	0.006	857.47	121.32
140	145.06	0.04	0.006	879.18	127.54
141	146.48	0.04	0.007	887.77	130.04
142	147.83	0.04	0.007	895.91	132.44
143	148.16	0.04	0.007	897.92	133.03
144	150.28	0.05	0.007	910.80	136.88
145	150.98	0.05	0.007	915.02	138.15
146	151.51	0.05	0.007	918.26	139.13
147	151.40	0.05	0.007	917.57	138.92
148	153.86	0.05	0.007	932.50	143.48
149	153.77	0.05	0.007	931.94	143.30
150	154.06	0.05	0.007	933.68	143.84

Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power Density (mW/m ²)
151	154.31	0.05	0.007	935.24	144.32
152	154.39	0.05	0.007	935.70	144.46
153	154.82	0.05	0.007	938.29	145.26
154	155.70	0.05	0.007	943.64	146.93
155	155.06	0.05	0.007	939.74	145.71
156	155.41	0.05	0.007	941.85	146.37
157	155.75	0.05	0.007	943.94	147.02
158	157.62	0.05	0.008	955.25	150.56
159	160.99	0.05	0.008	975.68	157.07
160	165.60	0.05	0.008	1003.63	166.20
161	170.55	0.05	0.009	1033.65	176.29
162	176.97	0.05	0.009	1072.52	189.80
163	182.27	0.06	0.010	1104.69	201.36
164	187.50	0.06	0.011	1136.37	213.07
165	191.71	0.06	0.011	1161.85	222.73
166	194.88	0.06	0.012	1181.10	230.17
167	199.72	0.06	0.012	1210.41	241.74
168	202.29	0.06	0.012	1226.02	248.02
169	205.61	0.06	0.013	1246.11	256.21
170	208.93	0.06	0.013	1266.23	264.55
171	211.51	0.06	0.014	1281.89	271.13
172	213.60	0.06	0.014	1294.53	276.51
173	215.60	0.07	0.014	1306.67	281.72
174	216.51	0.07	0.014	1312.19	284.11
175	218.08	0.07	0.014	1321.72	288.25
176	218.70	0.07	0.014	1325.48	289.89
177	218.78	0.07	0.015	1325.91	290.08
178	219.06	0.07	0.015	1327.63	290.83
179	219.49	0.07	0.015	1330.22	291.97
180	216.06	0.07	0.014	1309.43	282.91
181	217.44	0.07	0.014	1317.81	286.54
182	220.00	0.07	0.015	1333.35	293.34
183	222.17	0.07	0.015	1346.46	299.14
184	223.04	0.07	0.015	1351.79	301.51
185	221.50	0.07	0.015	1342.42	297.34
186	222.24	0.07	0.015	1346.88	299.32
187	222.26	0.07	0.015	1347.02	299.39
188	219.59	0.07	0.015	1330.82	292.23

Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power Density (mW/m ²)
189	219.65	0.07	0.015	1331.22	292.41
190	220.43	0.07	0.015	1335.94	294.48
191	222.53	0.07	0.015	1348.65	300.11
192	226.58	0.07	0.016	1373.23	311.15
193	227.25	0.07	0.016	1377.28	312.99
194	226.55	0.07	0.016	1373.04	311.06
195	233.40	0.07	0.017	1414.54	330.15
196	235.15	0.07	0.017	1425.15	335.12
197	234.75	0.07	0.017	1422.71	333.98
198	236.34	0.07	0.017	1432.35	338.52
199	237.50	0.07	0.017	1439.37	341.85
200	238.87	0.07	0.017	1447.69	345.81
201	241.06	0.07	0.018	1460.97	352.18
202	241.41	0.07	0.018	1463.08	353.20
203	242.73	0.07	0.018	1471.06	357.07
204	243.66	0.07	0.018	1476.73	359.82
205	243.32	0.07	0.018	1474.66	358.81
206	239.59	0.07	0.017	1452.05	347.89
207	241.89	0.07	0.018	1466.01	354.62
208	246.00	0.07	0.018	1490.90	366.76
209	245.10	0.07	0.018	1485.44	364.08
210	244.69	0.07	0.018	1482.97	362.87
211	247.98	0.08	0.019	1502.91	372.69
212	250.37	0.08	0.019	1517.40	379.91
213	248.68	0.08	0.019	1507.14	374.79
214	248.09	0.08	0.019	1503.60	373.03
215	250.20	0.08	0.019	1516.35	379.38
216	250.67	0.08	0.019	1519.22	380.82
217	251.51	0.08	0.019	1524.28	383.37
218	250.81	0.08	0.019	1520.04	381.23
219	248.59	0.08	0.019	1506.58	374.51
220	248.92	0.08	0.019	1508.61	375.52
221	246.42	0.07	0.018	1493.48	368.03
222	246.96	0.07	0.018	1496.75	369.64
223	248.27	0.08	0.019	1504.69	373.58
224	247.92	0.08	0.019	1502.56	372.52
225	246.31	0.07	0.018	1492.78	367.68
226	244.23	0.07	0.018	1480.16	361.49

Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ³)	Power Density (mW/m ³)
227	242.61	0.07	0.018	1470.37	356.73
228	241.59	0.07	0.018	1464.16	353.72
229	239.86	0.07	0.017	1453.69	348.68
230	241.00	0.07	0.018	1460.61	352.01
231	244.87	0.07	0.018	1484.05	363.40
232	242.06	0.07	0.018	1467.05	355.12
233	241.70	0.07	0.018	1464.87	354.06
234	239.52	0.07	0.017	1451.65	347.70
235	241.13	0.07	0.018	1461.37	352.37
236	241.39	0.07	0.018	1462.99	353.16
237	241.60	0.07	0.018	1464.24	353.76
238	244.48	0.07	0.018	1481.68	362.23
239	247.62	0.08	0.019	1500.74	371.61
240	248.43	0.08	0.019	1505.62	374.04

ตารางที่ 4 ผลการทดลองวัสดุของขั้วไฟฟ้า คาร์บอนกับแผ่นแกรไฟต์ (แคโทด : แอนโนด)

Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ³)	Power Density (mW/m ³)
1	451.21	0.21	0.093	4101.92	1850.84
2	371.97	0.17	0.063	3381.52	1257.81
3	343.62	0.16	0.054	3123.83	1073.42
4	322.11	0.15	0.047	2928.27	943.23
5	303.21	0.14	0.042	2756.45	835.78
6	285.93	0.13	0.037	2599.39	743.25
7	270.38	0.12	0.033	2458.02	664.60
8	256.61	0.12	0.030	2332.80	598.62
9	244.52	0.11	0.027	2222.92	543.55
10	234.00	0.11	0.025	2127.27	497.78
11	225.22	0.10	0.023	2047.48	461.14
12	218.11	0.10	0.022	1982.79	432.46
13	213.37	0.10	0.021	1939.73	413.88
14	209.78	0.10	0.020	1907.06	400.06
15	206.70	0.09	0.019	1879.09	388.41
16	203.85	0.09	0.019	1853.21	377.78
17	201.17	0.09	0.018	1828.79	367.89
18	198.37	0.09	0.018	1803.39	357.75

Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ³)	Power Density (mW/m ³)
19	195.62	0.09	0.017	1778.35	347.88
20	192.77	0.09	0.017	1752.42	337.81
21	190.45	0.09	0.016	1731.39	329.75
22	187.82	0.09	0.016	1707.44	320.69
23	185.10	0.08	0.016	1682.70	311.46
24	182.24	0.08	0.015	1656.70	301.91
25	179.55	0.08	0.015	1632.26	293.07
26	176.85	0.08	0.014	1607.70	284.32
27	174.35	0.08	0.014	1585.03	276.36
28	172.12	0.08	0.013	1564.70	269.31
29	169.80	0.08	0.013	1543.64	262.11
30	169.47	0.08	0.013	1540.59	261.08
31	168.32	0.08	0.013	1530.14	257.54
32	166.72	0.08	0.013	1515.65	252.69
33	165.05	0.08	0.012	1500.48	247.66
34	163.49	0.07	0.012	1486.26	242.99
35	161.89	0.07	0.012	1471.74	238.26
36	160.37	0.07	0.012	1457.86	233.79
37	158.94	0.07	0.011	1444.89	229.65
38	157.81	0.07	0.011	1434.61	226.39
39	156.62	0.07	0.011	1423.79	222.99
40	155.42	0.07	0.011	1412.89	219.59
41	154.54	0.07	0.011	1404.94	217.12
42	153.54	0.07	0.011	1395.85	214.32
43	152.77	0.07	0.011	1388.79	212.16
44	152.18	0.07	0.011	1383.47	210.54
45	151.52	0.07	0.010	1377.41	208.70
46	150.79	0.07	0.010	1370.77	206.69
47	150.11	0.07	0.010	1364.64	204.85
48	149.73	0.07	0.010	1361.15	203.80
49	148.86	0.07	0.010	1353.23	201.43
50	148.05	0.07	0.010	1345.92	199.27
51	147.24	0.07	0.010	1338.52	197.08
52	146.65	0.07	0.010	1333.20	195.52
53	146.04	0.07	0.010	1327.62	193.88
54	145.70	0.07	0.010	1324.50	192.97
55	145.32	0.07	0.010	1321.12	191.99
56	144.68	0.07	0.010	1315.23	190.28

Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power Density (mW/m ²)
57	144.05	0.07	0.009	1309.58	188.65
58	143.63	0.07	0.009	1305.70	187.53
59	143.19	0.07	0.009	1301.76	186.40
60	141.71	0.06	0.009	1288.28	182.56
61	130.10	0.06	0.008	1182.74	153.88
62	125.86	0.06	0.007	1144.15	144.00
63	123.07	0.06	0.007	1118.81	137.69
64	120.93	0.05	0.007	1099.39	132.95
65	119.16	0.05	0.006	1083.25	129.08
66	117.43	0.05	0.006	1067.54	125.36
67	116.07	0.05	0.006	1055.17	122.47
68	114.02	0.05	0.006	1036.51	118.18
69	112.26	0.05	0.006	1020.53	114.56
70	110.77	0.05	0.006	1007.04	111.55
71	109.40	0.05	0.005	994.56	108.81
72	108.16	0.05	0.005	983.24	106.34
73	106.51	0.05	0.005	968.27	103.13
74	103.62	0.05	0.005	942.02	97.62
75	103.44	0.05	0.005	940.36	97.27
76	103.19	0.05	0.005	938.09	96.80
77	103.38	0.05	0.005	939.82	97.16
78	104.77	0.05	0.005	952.48	99.79
79	106.90	0.05	0.005	971.82	103.89
80	109.37	0.05	0.005	994.30	108.75
81	111.70	0.05	0.006	1015.43	113.42
82	113.83	0.05	0.006	1034.80	117.79
83	115.31	0.05	0.006	1048.31	120.89
84	116.91	0.05	0.006	1062.81	124.25
85	118.17	0.05	0.006	1074.24	126.94
86	118.88	0.05	0.006	1080.74	128.48
87	119.52	0.05	0.006	1086.52	129.86
88	118.90	0.05	0.006	1080.95	128.53
89	118.27	0.05	0.006	1075.18	127.16
90	117.91	0.05	0.006	1071.89	126.38
91	117.86	0.05	0.006	1071.45	126.28
92	117.44	0.05	0.006	1067.61	125.38
93	116.95	0.05	0.006	1063.19	124.34
94	116.63	0.05	0.006	1060.23	123.65

Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ³)	Power Density (mW/m ³)
95	115.78	0.05	0.006	1052.52	121.86
96	115.83	0.05	0.006	1052.97	121.96
97	115.52	0.05	0.006	1050.19	121.32
98	115.13	0.05	0.006	1046.66	120.51
99	114.65	0.05	0.006	1042.25	119.49
100	113.16	0.05	0.006	1028.77	116.42
101	111.72	0.05	0.006	1015.67	113.47
102	110.96	0.05	0.006	1008.74	111.93
103	110.36	0.05	0.006	1003.27	110.72
104	111.03	0.05	0.006	1009.40	112.08
105	113.56	0.05	0.006	1032.33	117.23
106	115.89	0.05	0.006	1053.58	122.10
107	117.90	0.05	0.006	1071.78	126.36
108	120.33	0.05	0.007	1093.95	131.64
109	123.13	0.06	0.007	1119.40	137.84
110	125.59	0.06	0.007	1141.73	143.39
111	128.50	0.06	0.008	1168.17	150.11
112	130.64	0.06	0.008	1187.63	155.15
113	132.69	0.06	0.008	1206.23	160.05
114	134.00	0.06	0.008	1218.22	163.25
115	134.46	0.06	0.008	1222.41	164.37
116	134.46	0.06	0.008	1222.34	164.35
117	134.76	0.06	0.008	1225.11	165.10
118	134.67	0.06	0.008	1224.23	164.86
119	135.14	0.06	0.008	1228.59	166.04
120	135.10	0.06	0.008	1228.14	165.92
121	134.46	0.06	0.008	1222.35	164.35
122	133.84	0.06	0.008	1216.73	162.85
123	133.83	0.06	0.008	1216.59	162.81
124	133.74	0.06	0.008	1215.85	162.61
125	133.29	0.06	0.008	1211.76	161.52
126	132.51	0.06	0.008	1204.62	159.62
127	131.35	0.06	0.008	1194.09	156.84
128	130.89	0.06	0.008	1189.92	155.75
129	130.65	0.06	0.008	1187.71	155.17
130	129.33	0.06	0.008	1175.69	152.05
131	129.68	0.06	0.008	1178.92	152.88
132	132.24	0.06	0.008	1202.20	158.98

Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ³)	Power Density (mW/m ³)
133	134.54	0.06	0.008	1223.12	164.56
134	135.87	0.06	0.008	1235.14	167.81
135	137.55	0.06	0.009	1250.41	171.99
136	139.60	0.06	0.009	1269.07	177.16
137	141.67	0.06	0.009	1287.95	182.47
138	143.17	0.07	0.009	1301.57	186.35
139	144.25	0.07	0.009	1311.36	189.16
140	144.82	0.07	0.010	1316.57	190.67
141	145.02	0.07	0.010	1318.33	191.18
142	144.93	0.07	0.010	1317.51	190.94
143	144.49	0.07	0.009	1313.56	189.80
144	144.03	0.07	0.009	1309.33	188.58
145	143.83	0.07	0.009	1307.54	188.06
146	143.60	0.07	0.009	1305.43	187.46
147	143.54	0.07	0.009	1304.91	187.31
148	142.94	0.06	0.009	1299.48	185.75
149	141.94	0.06	0.009	1290.34	183.15
150	140.82	0.06	0.009	1280.15	180.27
151	140.30	0.06	0.009	1275.45	178.95
152	139.96	0.06	0.009	1272.32	178.07
153	139.81	0.06	0.009	1270.97	177.69
154	139.46	0.06	0.009	1267.80	176.81
155	138.63	0.06	0.009	1260.23	174.70
156	137.68	0.06	0.009	1251.65	172.33
157	137.16	0.06	0.009	1246.90	171.02
158	138.01	0.06	0.009	1254.67	173.16
159	140.25	0.06	0.009	1275.03	178.83
160	142.08	0.06	0.009	1291.60	183.50
161	143.01	0.07	0.009	1300.11	185.93
162	142.98	0.06	0.009	1299.81	185.84
163	142.97	0.06	0.009	1299.72	185.82
164	143.39	0.07	0.009	1303.57	186.92
165	144.19	0.07	0.009	1310.81	189.00
166	144.72	0.07	0.010	1315.68	190.41
167	144.98	0.07	0.010	1317.97	191.07
168	144.94	0.07	0.010	1317.63	190.98
169	144.91	0.07	0.010	1317.35	190.89
170	144.26	0.07	0.009	1311.43	189.18

Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power Density (mW/m ²)
171	143.87	0.07	0.009	1307.87	188.16
172	143.57	0.07	0.009	1305.19	187.39
173	143.38	0.07	0.009	1303.44	186.89
174	143.06	0.07	0.009	1300.56	186.06
175	142.40	0.06	0.009	1294.57	184.35
176	141.87	0.06	0.009	1289.69	182.96
177	141.36	0.06	0.009	1285.12	181.67
178	140.88	0.06	0.009	1280.73	180.43
179	140.36	0.06	0.009	1276.04	179.11
180	140.17	0.06	0.009	1274.24	178.61
181	140.01	0.06	0.009	1272.84	178.21
182	139.72	0.06	0.009	1270.16	177.46
183	139.33	0.06	0.009	1266.61	176.47
184	138.98	0.06	0.009	1263.47	175.60
185	138.78	0.06	0.009	1261.66	175.10
186	138.36	0.06	0.009	1257.85	174.04
187	137.94	0.06	0.009	1253.98	172.97
188	137.52	0.06	0.009	1250.19	171.93
189	136.69	0.06	0.008	1242.63	169.86
190	136.51	0.06	0.008	1240.98	169.40
191	136.77	0.06	0.009	1243.37	170.06
192	137.55	0.06	0.009	1250.47	172.00
193	138.45	0.06	0.009	1258.65	174.26
194	138.89	0.06	0.009	1262.68	175.38
195	139.52	0.06	0.009	1268.40	176.97
196	139.77	0.06	0.009	1270.59	177.58
197	139.90	0.06	0.009	1271.82	177.93
198	139.97	0.06	0.009	1272.42	178.10
199	140.21	0.06	0.009	1274.66	178.72
200	140.29	0.06	0.009	1275.32	178.91
201	139.98	0.06	0.009	1272.54	178.13
202	139.23	0.06	0.009	1265.76	176.24
203	138.44	0.06	0.009	1258.57	174.24
204	138.09	0.06	0.009	1255.35	173.35
205	137.85	0.06	0.009	1253.18	172.75
206	137.65	0.06	0.009	1251.37	172.25
207	137.68	0.06	0.009	1251.59	172.31
208	137.36	0.06	0.009	1248.75	171.53

Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ³)	Power Density (mW/m ³)
209	137.18	0.06	0.009	1247.09	171.07
210	136.99	0.06	0.009	1245.35	170.60
211	136.69	0.06	0.008	1242.67	169.87
212	136.42	0.06	0.008	1240.16	169.18
213	136.30	0.06	0.008	1239.14	168.90
214	136.01	0.06	0.008	1236.48	168.18
215	135.67	0.06	0.008	1233.40	167.34
216	135.51	0.06	0.008	1231.91	166.94
217	135.35	0.06	0.008	1230.46	166.54
218	134.63	0.06	0.008	1223.95	164.79
219	134.03	0.06	0.008	1218.49	163.32
220	133.92	0.06	0.008	1217.44	163.04
221	133.96	0.06	0.008	1217.79	163.13
222	131.39	0.06	0.008	1194.47	156.94
223	126.72	0.06	0.007	1152.04	145.99
224	124.39	0.06	0.007	1130.81	140.66
225	123.12	0.06	0.007	1119.24	137.80
226	122.35	0.06	0.007	1112.26	136.08
227	121.31	0.06	0.007	1102.81	133.78
228	120.67	0.05	0.007	1097.00	132.38
229	120.44	0.05	0.007	1094.94	131.88
230	118.92	0.05	0.006	1081.10	128.57
231	117.21	0.05	0.006	1065.52	124.89
232	114.80	0.05	0.006	1043.66	119.82
233	113.19	0.05	0.006	1028.96	116.46
234	110.26	0.05	0.006	1002.37	110.52
235	106.67	0.05	0.005	969.76	103.45
236	101.62	0.05	0.005	923.83	93.88
237	99.90	0.05	0.005	908.16	90.72
238	100.56	0.05	0.005	914.22	91.94
239	102.49	0.05	0.005	931.73	95.49
240	103.56	0.05	0.005	941.42	97.49

การทดลองที่ 2 เป็นการศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อการย่อยกากตะกอนส่วนเกินและการผลิตกำลังไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์

ตารางที่ 1 ผลของการทดลอง ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

Time (hr)	Temperature (Celsius)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ³)	Power Density (mW/m ³)
1	30.2	353.03	0.35	0.125	7060.56	2492.58
2	30.2	353.94	0.35	0.125	7078.74	2505.42
3	30.3	357.05	0.36	0.127	7141.06	2549.73
4	30.6	354.81	0.35	0.126	7096.15	2517.77
5	30.6	351.02	0.35	0.123	7020.38	2464.29
6	30.7	353.96	0.35	0.125	7079.27	2505.81
7	30.4	356.24	0.36	0.127	7124.84	2538.17
8	30.6	354.78	0.35	0.126	7095.63	2517.40
9	30.7	354.58	0.35	0.126	7091.66	2514.58
10	30.6	357.75	0.36	0.128	7154.96	2559.67
11	30.5	355.61	0.36	0.126	7112.21	2529.18
12	30.2	353.76	0.35	0.125	7075.26	2502.96
13	30.7	349.54	0.35	0.122	6990.89	2443.63
14	30.6	350.90	0.35	0.123	7018.07	2462.67
15	30.7	350.49	0.35	0.123	7009.85	2456.90
16	30.6	351.88	0.35	0.124	7037.70	2476.46
17	30.6	347.22	0.35	0.121	6944.49	2411.29
18	30.6	343.68	0.34	0.118	6873.64	2362.35
19	30.5	339.65	0.34	0.115	6793.09	2307.30
20	30.5	338.07	0.34	0.114	6761.36	2285.80
21	30.5	337.73	0.34	0.114	6754.59	2281.23
22	30.4	338.36	0.34	0.114	6767.17	2289.73
23	30.4	337.31	0.34	0.114	6746.21	2275.56
24	30.6	336.43	0.34	0.113	6728.59	2263.70
25	30.8	335.84	0.34	0.113	6716.89	2255.83
26	30.5	336.36	0.34	0.113	6727.19	2262.76
27	30.5	333.78	0.33	0.111	6675.62	2228.20
28	30.5	336.69	0.34	0.113	6733.80	2267.20
29	30.6	334.03	0.33	0.112	6680.64	2231.55
30	30.5	326.03	0.33	0.106	6520.59	2125.91
31	30.5	322.77	0.32	0.104	6455.40	2083.61
32	30.5	324.47	0.32	0.105	6489.46	2105.66

Time (hr)	Temperature (Celsius)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ³)	Power Density (mW/m ³)
33	30.5	322.80	0.32	0.104	6455.97	2083.98
34	30.6	321.85	0.32	0.104	6437.01	2071.75
35	30.5	319.27	0.32	0.102	6385.32	2038.62
36	30.5	318.78	0.32	0.102	6375.61	2032.42
37	30.5	319.17	0.32	0.102	6383.44	2037.42
38	30.6	317.86	0.32	0.101	6357.22	2020.71
39	30.5	317.60	0.32	0.101	6352.10	2017.46
40	30.5	318.66	0.32	0.102	6373.12	2030.83
41	30.5	318.74	0.32	0.102	6374.71	2031.85
42	30.5	317.54	0.32	0.101	6350.86	2016.67
43	30.4	319.78	0.32	0.102	6395.52	2045.13
44	30.5	321.32	0.32	0.103	6426.43	2064.95
45	30.4	322.46	0.32	0.104	6449.26	2079.65
46	30.4	320.14	0.32	0.102	6402.74	2049.75
47	30.5	319.87	0.32	0.102	6397.38	2046.32
48	30.4	320.19	0.32	0.103	6403.73	2050.39
49	30.4	317.48	0.32	0.101	6349.70	2015.93
50	30.5	314.54	0.31	0.099	6290.82	1978.72
51	30.5	311.52	0.31	0.097	6230.42	1940.91
52	30.6	310.18	0.31	0.096	6203.67	1924.27
53	30.6	308.81	0.31	0.095	6176.30	1907.33
54	30.5	306.89	0.31	0.094	6137.81	1883.64
55	30.5	306.29	0.31	0.094	6125.78	1876.26
56	30.6	305.41	0.31	0.093	6108.22	1865.51
57	30.5	305.08	0.31	0.093	6101.52	1861.43
58	30.5	305.16	0.31	0.093	6103.15	1862.42
59	30.5	305.02	0.31	0.093	6100.42	1860.75
60	30.5	303.39	0.30	0.092	6067.82	1840.92
61	30.4	301.80	0.30	0.091	6036.04	1821.69
62	30.4	297.13	0.30	0.088	5942.52	1765.68
63	30.5	290.71	0.29	0.085	5814.26	1690.28
64	30.4	288.18	0.29	0.083	5763.65	1660.98
65	30.5	287.57	0.29	0.083	5751.46	1653.97
66	30.4	280.12	0.28	0.078	5602.35	1569.31
67	30.5	278.31	0.28	0.077	5566.28	1549.18
68	30.6	276.85	0.28	0.077	5537.08	1532.96
69	30.4	275.04	0.28	0.076	5500.81	1512.95
70	30.5	272.30	0.27	0.074	5446.00	1482.95

Time (hr)	Temperature (Celsius)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ³)	Power Density (mW/m ³)
71	30.5	271.08	0.27	0.073	5421.61	1469.69
72	30.4	271.02	0.27	0.073	5420.45	1469.06
73	30.4	244.96	0.24	0.060	4899.11	1200.06
74	30.4	243.59	0.24	0.059	4871.79	1186.72
75	30.3	245.55	0.25	0.060	4911.02	1205.90
76	30.4	246.17	0.25	0.061	4923.42	1212.00
77	30.4	247.59	0.25	0.061	4951.78	1226.00
78	30.5	248.92	0.25	0.062	4978.34	1239.19
79	30.4	248.73	0.25	0.062	4974.69	1237.38
80	30.4	244.79	0.24	0.060	4895.80	1198.44
81	30.4	241.09	0.24	0.058	4821.87	1162.52
82	30.4	242.01	0.24	0.059	4840.28	1171.42
83	30.5	238.17	0.24	0.057	4763.35	1134.48
84	30.4	235.42	0.24	0.055	4708.31	1108.41
85	30.4	233.11	0.23	0.054	4662.24	1086.82
86	30.5	232.31	0.23	0.054	4646.29	1079.40
87	30.4	236.10	0.24	0.056	4722.05	1114.89
88	30.5	231.74	0.23	0.054	4634.86	1074.10
89	30.4	224.70	0.22	0.050	4493.93	1009.77
90	30.4	221.79	0.22	0.049	4435.71	983.78
91	30.4	220.42	0.22	0.049	4408.30	971.66
92	30.4	218.68	0.22	0.048	4373.56	956.40
93	30.4	212.08	0.21	0.045	4241.61	899.56
94	30.4	207.57	0.21	0.043	4151.47	861.73
95	30.4	210.22	0.21	0.044	4204.46	883.87
96	30.4	208.20	0.21	0.043	4163.90	866.90
97	30.4	208.91	0.21	0.044	4178.24	872.88
98	30.4	209.02	0.21	0.044	4180.36	873.77
99	30.4	203.74	0.20	0.042	4074.81	830.20
100	30.4	202.53	0.20	0.041	4050.58	820.36
101	30.4	200.49	0.20	0.040	4009.85	803.94
102	30.4	186.89	0.19	0.035	3737.77	698.55
103	30.4	162.09	0.16	0.026	3241.75	525.45
104	30.4	168.69	0.17	0.028	3373.88	569.15
105	30.4	181.49	0.18	0.033	3629.77	658.76
106	30.2	186.17	0.19	0.035	3723.48	693.21
107	30.4	185.05	0.19	0.034	3700.98	684.86
108	30.4	184.39	0.18	0.034	3687.77	679.98

Time (hr)	Temperature (Celsius)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ³)	Power Density (mW/m ³)
109	30.4	187.08	0.19	0.035	3741.67	700.00
110	30.4	188.24	0.19	0.035	3764.79	708.68
111	30.4	191.32	0.19	0.037	3826.46	732.09
112	30.5	191.60	0.19	0.037	3831.94	734.19
113	30.4	190.92	0.19	0.036	3818.40	729.01
114	30.4	193.60	0.19	0.037	3871.93	749.59
115	30.5	195.20	0.20	0.038	3903.91	762.02
116	30.4	193.63	0.19	0.037	3872.63	749.86
117	30.4	184.16	0.18	0.034	3683.26	678.32
118	30.4	166.10	0.17	0.028	3321.95	551.77
119	30.5	166.44	0.17	0.028	3328.82	554.05
120	30.4	159.87	0.16	0.026	3197.34	511.15
121	30.2	153.71	0.15	0.024	3074.19	472.53
122	30.2	149.23	0.15	0.022	2984.63	445.40
123	30.3	148.73	0.15	0.022	2974.54	442.39
124	30.6	145.67	0.15	0.021	2913.38	424.39
125	30.6	133.90	0.13	0.018	2677.99	358.58
126	30.7	122.70	0.12	0.015	2453.92	301.09
127	30.4	108.60	0.11	0.012	2171.95	235.87
128	30.6	99.36	0.10	0.010	1987.12	197.43
129	30.7	95.74	0.10	0.009	1914.71	183.31
130	30.6	89.47	0.09	0.008	1789.33	160.09
131	30.5	86.38	0.09	0.007	1727.50	149.21
132	30.2	81.84	0.08	0.007	1636.79	133.95
133	30.7	76.42	0.08	0.006	1528.37	116.80
134	30.6	68.33	0.07	0.005	1366.60	93.38
135	30.7	61.34	0.06	0.004	1226.76	75.25
136	30.6	55.38	0.06	0.003	1107.62	61.34
137	30.6	51.11	0.05	0.003	1022.10	52.23
138	30.6	47.45	0.05	0.002	948.92	45.02
139	30.5	44.34	0.04	0.002	886.87	39.33
140	30.7	42.67	0.04	0.002	853.39	36.41
141	30.6	42.08	0.04	0.002	841.58	35.41
142	30.5	42.07	0.04	0.002	841.32	35.39
143	30.4	41.63	0.04	0.002	832.68	34.67
144	30.4	41.55	0.04	0.002	830.90	34.52
145	30.5	43.90	0.04	0.002	878.05	38.55
146	30.4	41.28	0.04	0.002	825.66	34.09

Time (hr)	Temperature (Celsius)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ³)	Power Density (mW/m ³)
147	30.2	44.73	0.04	0.002	894.57	40.01
148	30.2	40.43	0.04	0.002	808.58	32.69
149	30.3	46.00	0.05	0.002	920.08	42.33
150	30.6	46.95	0.05	0.002	938.95	44.08
151	30.6	40.04	0.04	0.002	800.82	32.07
152	30.6	46.94	0.05	0.002	938.77	44.06
153	30.6	49.93	0.05	0.002	998.55	49.86
154	30.5	44.28	0.04	0.002	885.69	39.22
155	30.7	45.59	0.05	0.002	911.82	41.57
156	30.6	42.86	0.04	0.002	857.11	36.73
157	30.5	44.01	0.04	0.002	880.23	38.74
158	30.4	46.76	0.05	0.002	935.17	43.73
159	30.4	49.45	0.05	0.002	989.07	48.91
160	30.5	49.26	0.05	0.002	985.18	48.53
161	30.4	45.28	0.05	0.002	905.52	41.00
162	30.2	43.28	0.04	0.002	865.65	37.47
163	30.6	40.97	0.04	0.002	819.40	33.57
164	30.5	46.03	0.05	0.002	920.68	42.38
165	30.4	41.59	0.04	0.002	831.88	34.60
166	30.4	41.46	0.04	0.002	829.28	34.39
167	30.5	45.95	0.05	0.002	919.06	42.23
168	30.4	41.59	0.04	0.002	831.79	34.59
169	30.5	44.59	0.04	0.002	891.84	39.77
170	30.4	42.69	0.04	0.002	853.75	36.44
171	30.4	49.74	0.05	0.002	994.87	49.49
172	30.5	48.40	0.05	0.002	967.97	46.85
173	30.4	43.03	0.04	0.002	860.67	37.04
174	30.2	46.31	0.05	0.002	926.10	42.88
175	30.6	49.66	0.05	0.002	993.15	49.32
176	30.5	45.72	0.05	0.002	914.50	41.82
177	30.4	40.42	0.04	0.002	808.48	32.68
178	30.4	45.72	0.05	0.002	914.44	41.81
179	30.4	47.08	0.05	0.002	941.66	44.34
180	30.4	40.81	0.04	0.002	816.19	33.31
181	30.5	44.01	0.04	0.002	880.22	38.74
182	30.4	49.45	0.05	0.002	989.02	48.91
183	30.5	45.54	0.05	0.002	910.74	41.47
184	30.4	48.36	0.05	0.002	967.10	46.76

Time (hr)	Temperature (Celsius)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ³)	Power Density (mW/m ³)
185	30.4	41.86	0.04	0.002	837.26	35.05
186	30.5	47.43	0.05	0.002	948.53	44.99
187	30.4	44.29	0.04	0.002	885.79	39.23
188	30.2	41.63	0.04	0.002	832.65	34.67
189	30.6	48.53	0.05	0.002	970.53	47.10
190	30.5	44.96	0.04	0.002	899.25	40.43
191	30.6	43.02	0.04	0.002	860.49	37.02
192	30.7	40.30	0.04	0.002	805.96	32.48
193	30.6	41.26	0.04	0.002	825.12	34.04
194	30.5	43.17	0.04	0.002	863.32	37.27
195	30.2	43.27	0.04	0.002	865.31	37.44
196	30.7	41.66	0.04	0.002	833.23	34.71
197	30.6	49.51	0.05	0.002	990.14	49.02
198	30.7	47.26	0.05	0.002	945.24	44.67
199	30.6	45.37	0.05	0.002	907.38	41.17
200	30.6	44.00	0.04	0.002	880.07	38.73
201	30.6	42.63	0.04	0.002	852.61	36.35
202	30.5	41.76	0.04	0.002	835.18	34.88
203	30.4	40.33	0.04	0.002	806.61	32.53
204	30.2	49.73	0.05	0.002	994.63	49.46
205	30.6	48.46	0.05	0.002	969.18	46.97
206	30.5	46.38	0.05	0.002	927.65	43.03
207	30.4	46.29	0.05	0.002	925.83	42.86
208	30.4	44.74	0.04	0.002	894.86	40.04
209	30.5	43.88	0.04	0.002	877.56	38.51
210	30.5	41.81	0.04	0.002	836.22	34.96
211	30.4	40.56	0.04	0.002	811.27	32.91
212	30.4	48.87	0.05	0.002	977.31	47.76
213	30.5	46.74	0.05	0.002	934.86	43.70
214	30.4	44.69	0.04	0.002	893.78	39.94
215	30.5	43.59	0.04	0.002	871.87	38.01
216	30.3	42.96	0.04	0.002	859.25	36.92
217	30.6	33.19	0.03	0.001	663.74	22.03
218	30.6	33.38	0.03	0.001	667.62	22.29
219	30.6	32.19	0.03	0.001	643.82	20.73
220	30.6	38.31	0.04	0.001	766.11	29.35
221	30.5	31.54	0.03	0.001	630.76	19.89
222	30.7	32.11	0.03	0.001	642.23	20.62

Time (hr)	Temperature (Celsius)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power Density (mW/m ²)
223	30.6	30.34	0.03	0.001	606.75	18.41
224	30.4	36.52	0.04	0.001	730.36	26.67
225	30.5	37.37	0.04	0.001	747.43	27.93
226	30.4	37.30	0.04	0.001	745.97	27.82
227	30.5	34.12	0.03	0.001	682.45	23.29
228	30.4	32.63	0.03	0.001	652.64	21.30
229	30.4	31.20	0.03	0.001	624.00	19.47
230	30.5	38.74	0.04	0.002	774.87	30.02
231	30.4	30.80	0.03	0.001	615.96	18.97
232	30.4	38.33	0.04	0.001	766.64	29.39
233	30.5	33.65	0.03	0.001	673.02	22.65
234	30.4	31.28	0.03	0.001	625.63	19.57
235	30.2	39.42	0.04	0.002	788.32	31.07
236	30.6	39.94	0.04	0.002	798.70	31.90
237	30.5	30.69	0.03	0.001	613.75	18.83
238	30.6	37.64	0.04	0.001	752.86	28.34
239	30.7	30.41	0.03	0.001	608.29	18.50
240	30.6	35.45	0.04	0.001	709.05	25.14
241	30.5	34.16	0.03	0.001	683.21	23.34
242	30.2	33.18	0.03	0.001	663.64	22.02
243	30.7	31.57	0.03	0.001	631.43	19.94
244	30.6	38.95	0.04	0.002	779.02	30.34
245	30.5	30.91	0.03	0.001	618.19	19.11
246	30.4	34.06	0.03	0.001	681.22	23.20
247	30.4	32.89	0.03	0.001	657.73	21.63
248	30.5	33.70	0.03	0.001	673.93	22.71
249	30.4	34.55	0.03	0.001	690.98	23.87
250	30.2	38.14	0.04	0.001	762.90	29.10
251	30.6	22.14	0.02	0.000	442.74	9.80
252	30.6	28.37	0.03	0.001	567.45	16.10
253	30.7	26.60	0.03	0.001	532.09	14.16
254	30.6	23.79	0.02	0.001	475.78	11.32
255	30.5	20.21	0.02	0.000	404.29	8.17
256	30.2	29.21	0.03	0.001	584.21	17.07
257	30.7	26.97	0.03	0.001	539.46	14.55
258	30.6	23.25	0.02	0.001	465.03	10.81
259	30.5	28.56	0.03	0.001	571.14	16.31
260	30.4	23.42	0.02	0.001	468.36	10.97

Time (hr)	Temperature (Celsius)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ³)	Power Density (mW/m ³)
261	30.4	28.16	0.03	0.001	563.18	15.86
262	30.5	23.44	0.02	0.001	468.78	10.99
263	30.4	27.49	0.03	0.001	549.72	15.11
264	30.2	23.77	0.02	0.001	475.47	11.30
265	30.6	29.41	0.03	0.001	588.19	17.30
266	30.6	25.63	0.03	0.001	512.52	13.13
267	30.7	29.95	0.03	0.001	598.90	17.93
268	30.6	25.60	0.03	0.001	511.94	13.10
269	30.5	21.63	0.02	0.000	432.60	9.36
270	30.4	28.23	0.03	0.001	564.67	15.94
271	30.4	23.13	0.02	0.001	462.53	10.70
272	30.5	29.55	0.03	0.001	590.99	17.46
273	30.5	26.62	0.03	0.001	532.31	14.17
274	30.4	24.44	0.02	0.001	488.72	11.94
275	30.4	22.11	0.02	0.000	442.21	9.78
276	30.4	24.03	0.02	0.001	480.58	11.55
277	30.4	23.31	0.02	0.001	466.20	10.87
278	30.5	29.52	0.03	0.001	590.45	17.43
279	30.4	27.17	0.03	0.001	543.46	14.77
280	30.2	26.69	0.03	0.001	533.84	14.25
281	30.6	14.43	0.01	0.000	288.69	4.17
282	30.6	13.14	0.01	0.000	262.87	3.46
283	30.7	12.72	0.01	0.000	254.38	3.24
284	30.6	11.82	0.01	0.000	236.47	2.80
285	30.4	11.39	0.01	0.000	227.73	2.59
286	30.4	19.80	0.02	0.000	395.93	7.84
287	30.4	19.87	0.02	0.000	397.41	7.90
288	30.5	19.39	0.02	0.000	387.78	7.52
289	30.4	15.29	0.02	0.000	305.80	4.68
290	30.2	15.67	0.02	0.000	313.49	4.91
291	30.6	17.70	0.02	0.000	353.96	6.26
292	30.5	17.66	0.02	0.000	353.29	6.24
293	30.6	18.38	0.02	0.000	367.70	6.76
294	30.7	11.24	0.01	0.000	224.87	2.53
295	30.6	12.18	0.01	0.000	243.66	2.97
296	30.5	11.28	0.01	0.000	225.60	2.54
297	30.2	11.89	0.01	0.000	237.82	2.83
298	30.7	12.00	0.01	0.000	240.01	2.88

Time (hr)	Temperature (Celsius)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ³)	Power Density (mW/m ³)
299	30.2	19.85	0.02	0.000	396.96	7.88
300	30.6	14.64	0.01	0.000	292.77	4.29
301	30.6	11.22	0.01	0.000	224.48	2.52
302	30.7	13.94	0.01	0.000	278.89	3.89
303	30.6	11.63	0.01	0.000	232.69	2.71
304	30.4	11.71	0.01	0.000	234.24	2.74
305	30.5	13.48	0.01	0.000	269.68	3.64
306	30.4	16.91	0.02	0.000	338.17	5.72
307	30.2	10.68	0.01	0.000	213.63	2.28
308	30.6	14.76	0.01	0.000	295.18	4.36
309	30.6	10.19	0.01	0.000	203.84	2.08
310	30.7	17.88	0.02	0.000	357.66	6.40
311	30.6	15.42	0.02	0.000	308.39	4.76
312	30.4	11.42	0.01	0.000	228.50	2.61
313	30.4	18.43	0.02	0.000	368.65	6.79
314	30.4	15.45	0.02	0.000	309.06	4.78
315	30.4	11.97	0.01	0.000	239.37	2.86
316	30.5	18.89	0.02	0.000	377.79	7.14
317	30.4	15.13	0.02	0.000	302.57	4.58
318	30.2	12.15	0.01	0.000	242.94	2.95
319	30.6	19.04	0.02	0.000	380.72	7.25
320	30.7	16.76	0.02	0.000	335.27	5.62
321	30.6	16.20	0.02	0.000	323.98	5.25
322	30.5	16.33	0.02	0.000	326.61	5.33
323	30.2	16.52	0.02	0.000	330.42	5.46
324	30.7	17.32	0.02	0.000	346.43	6.00
325	30.2	18.08	0.02	0.000	361.51	6.53
326	30.7	18.63	0.02	0.000	372.58	6.94
327	30.6	18.90	0.02	0.000	377.92	7.14
328	30.5	19.54	0.02	0.000	390.77	7.63
329	30.2	10.60	0.01	0.000	211.98	2.25
330	30.7	10.92	0.01	0.000	218.39	2.38
331	30.2	11.96	0.01	0.000	239.15	2.86
332	30.6	11.63	0.01	0.000	232.55	2.70
333	30.6	11.28	0.01	0.000	225.62	2.55
334	30.4	10.32	0.01	0.000	206.32	2.13
335	30.4	19.39	0.02	0.000	387.78	7.52
336	30.4	18.32	0.02	0.000	366.33	6.71

Time (hr)	Temperature (Celsius)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ³)	Power Density (mW/m ³)
337	30.5	17.46	0.02	0.000	349.29	6.10
338	30.4	16.56	0.02	0.000	331.18	5.48
339	30.2	15.78	0.02	0.000	315.66	4.98
340	30.5	15.13	0.02	0.000	302.69	4.58
341	30.2	14.40	0.01	0.000	287.92	4.14
342	30.7	13.38	0.01	0.000	267.70	3.58
343	30.2	12.31	0.01	0.000	246.21	3.03
344	30.6	10.98	0.01	0.000	219.58	2.41
345	30.4	18.07	0.02	0.000	361.34	6.53
346	30.4	16.51	0.02	0.000	330.15	5.45
347	30.5	14.04	0.01	0.000	280.73	3.94
348	30.4	11.37	0.01	0.000	227.42	2.59
349	30.2	10.33	0.01	0.000	206.54	2.13
350	30.6	19.50	0.02	0.000	389.91	7.60
351	30.4	17.78	0.02	0.000	355.63	6.32
352	30.2	14.90	0.01	0.000	298.05	4.44
353	30.6	12.78	0.01	0.000	255.68	3.27
354	30.7	13.17	0.01	0.000	263.30	3.47
355	30.6	14.62	0.01	0.000	292.45	4.28
356	30.4	16.45	0.02	0.000	328.92	5.41
357	30.4	18.35	0.02	0.000	366.97	6.73
358	30.4	10.26	0.01	0.000	205.28	2.11
359	30.5	11.24	0.01	0.000	224.78	2.53
360	30.4	11.73	0.01	0.000	234.62	2.75
361	30.5	12.01	0.01	0.000	240.26	2.89
362	30.2	11.53	0.01	0.000	230.52	2.66
363	30.7	11.27	0.01	0.000	225.30	2.54
364	30.2	17.04	0.02	0.000	340.81	5.81
365	30.6	15.79	0.02	0.000	315.71	4.98
366	30.6	14.62	0.01	0.000	292.49	4.28
367	30.7	12.79	0.01	0.000	255.83	3.27
368	30.6	11.85	0.01	0.000	236.91	2.81
369	30.4	19.33	0.02	0.000	386.52	7.47
370	30.5	16.44	0.02	0.000	328.74	5.40
371	30.2	14.66	0.01	0.000	293.26	4.30
372	30.7	12.74	0.01	0.000	254.82	3.25
373	30.2	10.44	0.01	0.000	208.76	2.18
374	30.7	18.33	0.02	0.000	366.62	6.72

Time (hr)	Temperature (Celsius)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ³)	Power Density (mW/m ³)
375	30.6	16.26	0.02	0.000	325.22	5.29
376	30.7	13.38	0.01	0.000	267.55	3.58
377	30.6	11.17	0.01	0.000	223.38	2.49
378	30.4	18.99	0.02	0.000	379.77	7.21
379	30.4	16.93	0.02	0.000	338.51	5.73
380	30.6	14.45	0.01	0.000	289.06	4.18
381	30.7	12.02	0.01	0.000	240.32	2.89
382	30.6	19.86	0.02	0.000	397.26	7.89
383	30.4	18.01	0.02	0.000	360.21	6.49
384	30.4	16.45	0.02	0.000	329.01	5.41
385	30.4	15.12	0.02	0.000	302.39	4.57
386	30.4	13.82	0.01	0.000	276.35	3.82
387	30.5	12.28	0.01	0.000	245.67	3.02
388	30.4	11.17	0.01	0.000	223.40	2.50
389	30.7	19.52	0.02	0.000	390.34	7.62
390	30.6	17.88	0.02	0.000	357.70	6.40
391	30.5	16.83	0.02	0.000	336.61	5.67
392	30.2	15.72	0.02	0.000	314.38	4.94
393	30.2	15.19	0.02	0.000	303.87	4.62
394	30.6	15.35	0.02	0.000	307.03	4.71
395	30.7	15.61	0.02	0.000	312.22	4.87
396	30.6	16.09	0.02	0.000	321.87	5.18
397	30.5	16.97	0.02	0.000	339.47	5.76
398	30.4	17.84	0.02	0.000	356.76	6.36
399	30.5	18.46	0.02	0.000	369.18	6.81
400	30.2	19.08	0.02	0.000	381.51	7.28
401	30.7	19.48	0.02	0.000	389.59	7.59
402	30.5	19.78	0.02	0.000	395.65	7.83
403	30.2	19.57	0.02	0.000	391.33	7.66
404	30.7	19.38	0.02	0.000	387.60	7.51
405	30.2	18.91	0.02	0.000	378.28	7.15
406	30.7	18.12	0.02	0.000	362.42	6.57
407	30.6	17.12	0.02	0.000	342.43	5.86
408	30.4	16.03	0.02	0.000	320.52	5.14
409	30.2	11.52	0.01	0.000	230.44	2.66
410	30.6	14.73	0.01	0.000	294.56	4.34
411	30.4	13.93	0.01	0.000	278.68	3.88
412	30.2	11.32	0.01	0.000	226.46	2.56

Time (hr)	Temperature (Celsius)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ³)	Power Density (mW/m ³)
413	30.6	12.78	0.01	0.000	255.67	3.27
414	30.6	11.97	0.01	0.000	239.35	2.86
415	30.6	10.67	0.01	0.000	213.41	2.28
416	30.7	19.66	0.02	0.000	393.12	7.73
417	30.6	18.54	0.02	0.000	370.74	6.87
418	30.4	17.26	0.02	0.000	345.30	5.96
419	30.5	16.17	0.02	0.000	323.43	5.23
420	30.2	15.25	0.02	0.000	305.07	4.65
421	30.4	14.43	0.01	0.000	288.65	4.17
422	30.4	13.56	0.01	0.000	271.29	3.68
423	30.5	12.26	0.01	0.000	245.28	3.01
424	30.4	11.66	0.01	0.000	233.23	2.72
425	30.4	10.86	0.01	0.000	217.11	2.36
426	30.4	10.31	0.01	0.000	206.25	2.13
427	30.5	10.23	0.01	0.000	204.54	2.09
428	30.4	10.25	0.01	0.000	205.00	2.10
429	30.7	10.61	0.01	0.000	212.18	2.25
430	30.6	10.91	0.01	0.000	218.20	2.38
431	30.5	11.12	0.01	0.000	222.46	2.47
432	30.2	11.26	0.01	0.000	225.25	2.54

ตารางที่ 2 ผลของการทดลอง ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส

Time (hr)	Temperature (Celsius)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ³)	Power Density (mW/m ³)
1	35.2	294.67	0.29	0.087	5893.33	1736.57
2	35.5	294.89	0.29	0.087	5897.87	1739.24
3	35.5	293.74	0.29	0.086	5874.79	1725.66
4	35.7	302.38	0.30	0.091	6047.62	1828.68
5	35.7	304.01	0.30	0.092	6080.13	1848.40
6	35.8	300.53	0.30	0.090	6010.62	1806.38
7	36.0	296.50	0.30	0.088	5930.08	1758.29
8	35.9	292.24	0.29	0.085	5844.79	1708.08
9	35.8	290.07	0.29	0.084	5801.37	1682.79
10	35.8	285.25	0.29	0.081	5705.00	1627.35
11	35.9	285.99	0.29	0.082	5719.83	1635.82

Time (hr)	Temperature (Celsius)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ³)	Power Density (mW/m ³)
12	36.0	281.68	0.28	0.079	5633.51	1586.82
13	35.9	277.49	0.28	0.077	5549.81	1540.02
14	35.8	273.71	0.27	0.075	5474.21	1498.35
15	35.8	258.65	0.26	0.067	5173.00	1338.00
16	35.8	251.18	0.25	0.063	5023.67	1261.86
17	35.8	244.01	0.24	0.060	4880.19	1190.81
18	35.7	232.48	0.23	0.054	4649.60	1080.94
19	35.6	238.98	0.24	0.057	4779.53	1142.19
20	35.7	244.96	0.24	0.060	4899.16	1200.09
21	35.6	250.01	0.25	0.063	5000.20	1250.10
22	35.6	243.32	0.24	0.059	4866.42	1184.10
23	35.6	232.16	0.23	0.054	4643.20	1077.96
24	35.7	225.45	0.23	0.051	4509.06	1016.58
25	35.7	213.84	0.21	0.046	4276.76	914.53
26	35.5	203.32	0.20	0.041	4066.31	826.74
27	35.6	199.12	0.20	0.040	3982.49	793.01
28	35.7	183.16	0.18	0.034	3663.13	670.93
29	35.6	177.39	0.18	0.031	3547.76	629.33
30	35.5	167.88	0.17	0.028	3357.54	563.65
31	35.6	158.20	0.16	0.025	3164.03	500.55
32	35.6	147.66	0.15	0.022	2953.26	436.09
33	35.6	138.19	0.14	0.019	2763.90	381.96
34	35.6	129.07	0.13	0.017	2581.35	333.17
35	35.6	123.50	0.12	0.015	2470.01	305.05
36	35.6	121.97	0.12	0.015	2439.30	297.51
37	35.8	120.23	0.12	0.014	2404.53	289.09
38	35.6	115.71	0.12	0.013	2314.14	267.76
39	35.8	113.06	0.11	0.013	2261.15	255.64
40	35.8	109.45	0.11	0.012	2189.00	239.59
41	35.7	104.84	0.10	0.011	2096.81	219.83
42	35.9	100.81	0.10	0.010	2016.11	203.24
43	35.9	96.62	0.10	0.009	1932.42	186.71
44	35.7	91.68	0.09	0.008	1833.63	168.11
45	35.8	87.49	0.09	0.008	1749.73	153.08
46	35.8	82.86	0.08	0.007	1657.16	137.31
47	35.9	78.71	0.08	0.006	1574.27	123.92
48	35.9	75.69	0.08	0.006	1513.84	114.59
49	35.7	73.02	0.07	0.005	1460.31	106.62

Time (hr)	Temperature (Celsius)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ³)	Power Density (mW/m ³)
50	36.2	70.39	0.07	0.005	1407.71	99.08
51	35.7	67.43	0.07	0.005	1348.68	90.95
52	35.5	65.52	0.07	0.004	1310.35	85.85
53	35.5	65.44	0.07	0.004	1308.83	85.65
54	35.5	66.34	0.07	0.004	1326.83	88.02
55	35.5	67.98	0.07	0.005	1359.64	92.43
56	35.5	69.16	0.07	0.005	1383.18	95.66
57	35.7	69.69	0.07	0.005	1393.87	97.14
58	35.7	69.31	0.07	0.005	1386.11	96.07
59	35.6	68.03	0.07	0.005	1360.60	92.56
60	35.6	66.05	0.07	0.004	1321.08	87.26
61	35.7	64.71	0.06	0.004	1294.27	83.76
62	35.7	63.30	0.06	0.004	1265.96	80.13
63	35.7	62.02	0.06	0.004	1240.38	76.93
64	35.7	59.80	0.06	0.004	1196.07	71.53
65	35.9	57.56	0.06	0.003	1151.21	66.26
66	35.8	55.50	0.06	0.003	1110.00	61.60
67	35.5	53.80	0.05	0.003	1075.92	57.88
68	35.5	51.85	0.05	0.003	1037.01	53.77
69	35.6	50.54	0.05	0.003	1010.71	51.08
70	35.7	50.24	0.05	0.003	1004.85	50.49
71	35.9	50.76	0.05	0.003	1015.23	51.54
72	35.7	51.14	0.05	0.003	1022.89	52.31
73	35.7	28.07	0.03	0.001	561.42	15.76
74	35.8	28.65	0.03	0.001	572.97	16.41
75	35.6	29.13	0.03	0.001	582.59	16.97
76	35.7	30.06	0.03	0.001	601.19	18.07
77	35.5	30.93	0.03	0.001	618.62	19.13
78	35.6	31.93	0.03	0.001	638.60	20.39
79	35.5	32.51	0.03	0.001	650.27	21.14
80	35.7	33.17	0.03	0.001	663.34	22.00
81	35.8	34.19	0.03	0.001	683.73	23.37
82	35.7	34.60	0.03	0.001	692.06	23.95
83	35.7	35.40	0.04	0.001	707.99	25.06
84	35.8	35.98	0.04	0.001	719.62	25.89
85	35.9	36.93	0.04	0.001	738.67	27.28
86	35.8	37.53	0.04	0.001	750.58	28.17
87	35.6	37.96	0.04	0.001	759.20	28.82

Time (hr)	Temperature (Celsius)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ³)	Power Density (mW/m ³)
88	35.6	38.26	0.04	0.001	765.30	29.28
89	35.7	38.34	0.04	0.001	766.71	29.39
90	35.7	38.34	0.04	0.001	766.76	29.40
91	35.6	38.43	0.04	0.001	768.70	29.54
92	35.7	38.63	0.04	0.001	772.56	29.84
93	35.8	38.88	0.04	0.002	777.67	30.24
94	35.9	39.26	0.04	0.002	785.26	30.83
95	35.9	39.67	0.04	0.002	793.35	31.47
96	35.7	40.20	0.04	0.002	803.96	32.32
97	35.7	40.81	0.04	0.002	816.17	33.31
98	35.9	41.40	0.04	0.002	828.04	34.28
99	35.8	41.50	0.04	0.002	830.00	34.45
100	35.9	42.06	0.04	0.002	841.12	35.37
101	35.5	42.39	0.04	0.002	847.89	35.95
102	35.5	43.02	0.04	0.002	860.37	37.01
103	35.5	43.09	0.04	0.002	861.82	37.14
104	35.6	43.00	0.04	0.002	859.99	36.98
105	35.5	42.74	0.04	0.002	854.81	36.53
106	35.5	42.92	0.04	0.002	858.38	36.84
107	35.5	43.20	0.04	0.002	864.03	37.33
108	35.8	43.38	0.04	0.002	867.70	37.65
109	35.6	43.54	0.04	0.002	870.86	37.92
110	35.5	43.90	0.04	0.002	878.02	38.55
111	35.7	44.82	0.04	0.002	896.48	40.18
112	35.9	45.45	0.05	0.002	908.99	41.31
113	35.8	45.79	0.05	0.002	915.79	41.93
114	35.9	46.68	0.05	0.002	933.52	43.57
115	35.5	51.06	0.05	0.003	1021.18	52.14
116	35.7	57.45	0.06	0.003	1148.93	66.00
117	35.8	61.18	0.06	0.004	1223.56	74.85
118	35.6	67.34	0.07	0.005	1346.81	90.70
119	35.7	72.62	0.07	0.005	1452.46	105.48
120	35.8	74.80	0.07	0.006	1495.95	111.89
121	35.7	76.80	0.08	0.006	1535.93	117.95
122	35.8	79.73	0.08	0.006	1594.66	127.15
123	35.6	81.56	0.08	0.007	1631.26	133.05
124	35.8	80.31	0.08	0.006	1606.21	129.00
125	35.4	77.08	0.08	0.006	1541.59	118.83

Time (hr)	Temperature (Celsius)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ³)	Power Density (mW/m ³)
126	35.7	72.66	0.07	0.005	1453.29	105.60
127	35.9	68.22	0.07	0.005	1364.30	93.07
128	35.7	63.94	0.06	0.004	1278.74	81.76
129	35.8	59.43	0.06	0.004	1188.54	70.63
130	35.3	54.96	0.05	0.003	1099.13	60.40
131	35.7	50.91	0.05	0.003	1018.14	51.83
132	35.7	48.06	0.05	0.002	961.23	46.20
133	35.7	46.69	0.05	0.002	933.71	43.59
134	35.8	45.31	0.05	0.002	906.30	41.07
135	35.8	43.76	0.04	0.002	875.27	38.30
136	35.4	38.76	0.04	0.002	775.23	30.05
137	35.6	36.90	0.04	0.001	737.94	27.23
138	35.5	35.68	0.04	0.001	713.63	25.46
139	35.3	34.48	0.03	0.001	689.57	23.78
140	35.8	33.01	0.03	0.001	660.19	21.79
141	35.7	30.13	0.03	0.001	602.55	18.15
142	35.5	26.62	0.03	0.001	532.37	14.17
143	35.5	25.77	0.03	0.001	515.39	13.28
144	35.4	24.96	0.02	0.001	499.26	12.46
145	35.7	50.80	0.05	0.003	1016.05	51.62
146	35.6	52.95	0.05	0.003	1059.10	56.08
147	35.6	50.67	0.05	0.003	1013.30	51.34
148	35.7	49.67	0.05	0.002	993.33	49.34
149	35.7	47.30	0.05	0.002	946.02	44.75
150	35.7	43.12	0.04	0.002	862.38	37.19
151	35.7	40.17	0.04	0.002	803.31	32.27
152	35.9	36.36	0.04	0.001	727.18	26.44
153	35.8	35.40	0.04	0.001	707.91	25.06
154	35.5	34.25	0.03	0.001	684.91	23.46
155	35.5	32.86	0.03	0.001	657.11	21.59
156	35.6	30.55	0.03	0.001	611.03	18.67
157	35.7	28.18	0.03	0.001	563.62	15.88
158	35.9	26.19	0.03	0.001	523.87	13.72
159	35.7	24.27	0.02	0.001	485.37	11.78
160	35.7	22.81	0.02	0.001	456.22	10.41
161	35.8	22.43	0.02	0.001	448.61	10.06
162	35.6	22.18	0.02	0.000	443.60	9.84
163	35.7	21.49	0.02	0.000	429.78	9.24

Time (hr)	Temperature (Celsius)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ³)	Power Density (mW/m ³)
164	35.5	19.54	0.02	0.000	390.73	7.63
165	35.6	18.95	0.02	0.000	378.96	7.18
166	35.5	16.39	0.02	0.000	327.74	5.37
167	35.7	14.69	0.01	0.000	293.73	4.31
168	35.8	12.04	0.01	0.000	240.89	2.90
169	35.7	19.33	0.02	0.000	386.58	7.47
170	35.7	17.23	0.02	0.000	344.68	5.94
171	35.8	15.82	0.02	0.000	316.46	5.01
172	35.9	14.28	0.01	0.000	285.62	4.08
173	35.8	13.50	0.01	0.000	269.97	3.64
174	35.6	13.07	0.01	0.000	261.42	3.42
175	35.6	12.72	0.01	0.000	254.45	3.24
176	35.7	12.47	0.01	0.000	249.39	3.11
177	35.8	12.28	0.01	0.000	245.52	3.01
178	35.7	12.15	0.01	0.000	243.05	2.95
179	35.8	11.87	0.01	0.000	237.50	2.82
180	35.6	11.67	0.01	0.000	233.37	2.72
181	35.8	11.50	0.01	0.000	230.04	2.65
182	35.4	11.39	0.01	0.000	227.79	2.59
183	35.7	11.28	0.01	0.000	225.51	2.54
184	35.9	11.10	0.01	0.000	222.05	2.47
185	35.7	11.03	0.01	0.000	220.61	2.43
186	35.8	11.98	0.01	0.000	239.50	2.87
187	35.3	11.88	0.01	0.000	237.69	2.82
188	35.7	11.81	0.01	0.000	236.15	2.79
189	35.7	11.70	0.01	0.000	234.10	2.74
190	35.9	16.06	0.02	0.000	321.29	5.16
191	35.7	11.50	0.01	0.000	230.05	2.65
192	35.7	11.43	0.01	0.000	228.52	2.61
193	35.8	11.38	0.01	0.000	227.66	2.59
194	35.6	11.30	0.01	0.000	226.09	2.56
195	35.7	10.25	0.01	0.000	205.03	2.10
196	35.5	10.22	0.01	0.000	204.45	2.09
197	35.6	10.20	0.01	0.000	204.09	2.08
198	35.5	10.20	0.01	0.000	203.96	2.08
199	35.7	10.19	0.01	0.000	203.83	2.08
200	35.8	10.19	0.01	0.000	203.74	2.08
201	35.7	10.18	0.01	0.000	203.59	2.07

Time (hr)	Temperature (Celsius)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ³)	Power Density (mW/m ³)
202	35.7	10.17	0.01	0.000	203.33	2.07
203	35.8	10.16	0.01	0.000	203.20	2.06
204	35.9	10.17	0.01	0.000	203.36	2.07
205	35.8	11.87	0.01	0.000	237.32	2.82
206	35.6	10.20	0.01	0.000	204.02	2.08
207	35.6	10.21	0.01	0.000	204.22	2.09
208	35.7	10.21	0.01	0.000	204.27	2.09
209	35.8	10.21	0.01	0.000	204.20	2.08
210	35.7	12.05	0.01	0.000	241.06	2.91
211	35.8	10.20	0.01	0.000	204.02	2.08
212	35.8	10.20	0.01	0.000	203.92	2.08
213	35.7	10.18	0.01	0.000	203.58	2.07
214	35.7	10.15	0.01	0.000	203.07	2.06
215	35.8	10.15	0.01	0.000	202.93	2.06
216	35.9	10.14	0.01	0.000	202.85	2.06
217	35.8	17.19	0.02	0.000	343.74	5.91
218	35.6	15.78	0.02	0.000	315.59	4.98
219	35.6	12.07	0.01	0.000	241.44	2.91
220	35.7	12.07	0.01	0.000	241.35	2.91
221	35.8	12.33	0.01	0.000	246.69	3.04
222	35.7	12.94	0.01	0.000	258.88	3.35
223	35.8	11.94	0.01	0.000	238.83	2.85
224	35.6	18.97	0.02	0.000	379.43	7.20
225	35.8	17.54	0.02	0.000	350.75	6.15
226	35.4	17.64	0.02	0.000	352.76	6.22
227	35.7	18.02	0.02	0.000	360.46	6.50
228	35.9	16.24	0.02	0.000	324.73	5.27
229	35.7	16.79	0.02	0.000	335.74	5.64
230	35.8	17.56	0.02	0.000	351.28	6.17
231	35.3	17.24	0.02	0.000	344.77	5.94
232	35.7	16.80	0.02	0.000	336.05	5.65
233	35.7	16.39	0.02	0.000	327.70	5.37
234	35.9	16.04	0.02	0.000	320.71	5.14
235	35.7	15.64	0.02	0.000	312.72	4.89
236	35.7	15.28	0.02	0.000	305.54	4.67
237	35.8	14.92	0.01	0.000	298.50	4.46
238	35.6	14.63	0.01	0.000	292.55	4.28
239	35.7	14.34	0.01	0.000	286.82	4.11

Time (hr)	Temperature (Celsius)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ³)	Power Density (mW/m ³)
240	35.5	13.96	0.01	0.000	279.23	3.90
241	35.6	13.43	0.01	0.000	268.52	3.61
242	35.5	12.95	0.01	0.000	259.01	3.35
243	35.7	12.62	0.01	0.000	252.49	3.19
244	35.8	12.42	0.01	0.000	248.36	3.08
245	35.7	12.32	0.01	0.000	246.46	3.04
246	35.7	12.27	0.01	0.000	245.47	3.01
247	35.8	12.24	0.01	0.000	244.79	3.00
248	35.9	12.20	0.01	0.000	244.09	2.98
249	35.8	12.16	0.01	0.000	243.30	2.96
250	35.6	12.14	0.01	0.000	242.81	2.95
251	35.6	12.07	0.01	0.000	241.43	2.91
252	35.7	19.75	0.02	0.000	395.06	7.80
253	35.8	18.44	0.02	0.000	368.84	6.80
254	35.7	17.56	0.02	0.000	351.23	6.17
255	35.8	17.73	0.02	0.000	354.67	6.29
256	35.8	17.06	0.02	0.000	341.12	5.82
257	35.7	16.32	0.02	0.000	326.33	5.32
258	35.7	16.08	0.02	0.000	321.53	5.17
259	35.8	15.17	0.02	0.000	303.41	4.60
260	35.9	14.21	0.01	0.000	284.25	4.04
261	35.8	13.15	0.01	0.000	262.94	3.46
262	35.6	12.42	0.01	0.000	248.34	3.08
263	35.6	11.15	0.01	0.000	223.02	2.49
264	35.7	10.97	0.01	0.000	219.30	2.40
265	35.8	10.83	0.01	0.000	216.67	2.35
266	35.7	10.69	0.01	0.000	213.71	2.28
267	35.8	10.60	0.01	0.000	211.95	2.25
268	35.6	10.54	0.01	0.000	210.88	2.22
269	35.8	10.51	0.01	0.000	210.25	2.21
270	35.4	10.49	0.01	0.000	209.79	2.20
271	35.3	10.46	0.01	0.000	209.27	2.19
272	35.7	10.44	0.01	0.000	208.82	2.18
273	35.7	10.42	0.01	0.000	208.45	2.17
274	35.7	10.39	0.01	0.000	207.88	2.16
275	35.8	10.37	0.01	0.000	207.40	2.15
276	35.8	10.36	0.01	0.000	207.24	2.15
277	35.4	10.37	0.01	0.000	207.34	2.15

Time (hr)	Temperature (Celsius)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power Density (mW/m ²)
278	35.6	10.36	0.01	0.000	207.19	2.15
279	35.5	10.35	0.01	0.000	207.06	2.14
280	35.4	10.32	0.01	0.000	206.35	2.13
281	35.3	10.28	0.01	0.000	205.70	2.12
282	35.7	10.23	0.01	0.000	204.63	2.09
283	35.8	10.21	0.01	0.000	204.25	2.09
284	35.6	10.20	0.01	0.000	203.93	2.08
285	35.6	10.18	0.01	0.000	203.55	2.07
286	35.7	10.16	0.01	0.000	203.13	2.06
287	35.8	10.14	0.01	0.000	202.84	2.06
288	35.7	10.14	0.01	0.000	202.70	2.05
289	35.8	15.45	0.02	0.000	308.93	4.77
290	35.5	15.68	0.02	0.000	313.58	4.92
291	35.7	15.84	0.02	0.000	316.83	5.02
292	35.8	16.06	0.02	0.000	321.11	5.16
293	35.7	15.89	0.02	0.000	317.89	5.05
294	35.8	15.99	0.02	0.000	319.83	5.11
295	35.6	16.28	0.02	0.000	325.66	5.30
296	35.6	16.45	0.02	0.000	328.95	5.41
297	35.7	16.63	0.02	0.000	332.52	5.53
298	35.8	16.53	0.02	0.000	330.66	5.47
299	35.5	16.50	0.02	0.000	330.08	5.45
300	35.7	16.33	0.02	0.000	326.58	5.33
301	35.8	16.13	0.02	0.000	322.67	5.21
302	35.7	15.92	0.02	0.000	318.38	5.07
303	35.7	15.67	0.02	0.000	313.46	4.91
304	35.8	15.37	0.02	0.000	307.31	4.72
305	35.9	15.11	0.02	0.000	302.23	4.57
306	35.9	14.63	0.01	0.000	292.51	4.28
307	35.7	14.19	0.01	0.000	283.80	4.03
308	35.7	13.94	0.01	0.000	278.85	3.89
309	35.8	13.73	0.01	0.000	274.61	3.77
310	35.6	13.51	0.01	0.000	270.13	3.65
311	35.7	13.28	0.01	0.000	265.55	3.53
312	35.8	13.02	0.01	0.000	260.38	3.39
313	35.6	12.75	0.01	0.000	255.01	3.25
314	35.8	12.49	0.01	0.000	249.75	3.12
315	35.4	12.14	0.01	0.000	242.78	2.95

Time (hr)	Temperature (Celsius)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ³)	Power Density (mW/m ³)
316	35.7	11.82	0.01	0.000	236.42	2.79
317	35.9	16.49	0.02	0.000	329.89	5.44
318	35.7	15.40	0.02	0.000	307.99	4.74
319	35.8	14.37	0.01	0.000	287.32	4.13
320	35.4	13.45	0.01	0.000	268.96	3.62
321	35.6	12.61	0.01	0.000	252.12	3.18
322	35.5	11.58	0.01	0.000	231.63	2.68
323	35.4	10.71	0.01	0.000	214.17	2.29
324	35.3	10.99	0.01	0.000	219.75	2.41
325	35.7	10.92	0.01	0.000	218.45	2.39
326	35.8	10.88	0.01	0.000	217.63	2.37
327	35.9	10.83	0.01	0.000	216.62	2.35
328	35.7	10.76	0.01	0.000	215.26	2.32
329	35.8	10.71	0.01	0.000	214.19	2.29
330	35.4	10.67	0.01	0.000	213.32	2.28
331	35.6	10.63	0.01	0.000	212.59	2.26
332	35.9	10.57	0.01	0.000	211.36	2.23
333	35.9	10.52	0.01	0.000	210.47	2.21
334	35.7	10.48	0.01	0.000	209.52	2.19
335	35.8	10.40	0.01	0.000	207.99	2.16
336	35.8	10.34	0.01	0.000	206.81	2.14
337	35.7	10.30	0.01	0.000	206.10	2.12
338	35.7	10.25	0.01	0.000	205.05	2.10
339	35.8	10.21	0.01	0.000	204.26	2.09
340	35.9	10.19	0.01	0.000	203.82	2.08
341	35.8	10.18	0.01	0.000	203.58	2.07
342	35.6	10.17	0.01	0.000	203.49	2.07
343	35.9	10.17	0.01	0.000	203.35	2.07
344	35.9	10.16	0.01	0.000	203.25	2.07
345	35.7	10.16	0.01	0.000	203.14	2.06
346	35.8	10.15	0.01	0.000	203.03	2.06
347	35.8	10.14	0.01	0.000	202.75	2.06
348	35.7	10.13	0.01	0.000	202.69	2.05
349	35.7	10.14	0.01	0.000	202.79	2.06
350	35.7	10.14	0.01	0.000	202.79	2.06
351	35.8	10.14	0.01	0.000	202.81	2.06
352	35.6	10.14	0.01	0.000	202.75	2.06
353	35.8	10.13	0.01	0.000	202.66	2.05

Time (hr)	Temperature (Celsius)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ³)	Power Density (mW/m ³)
354	35.4	10.13	0.01	0.000	202.54	2.05
355	35.3	10.12	0.01	0.000	202.48	2.05
356	35.7	10.12	0.01	0.000	202.42	2.05
357	35.7	10.12	0.01	0.000	202.33	2.05
358	35.6	10.11	0.01	0.000	202.23	2.04
359	35.7	10.11	0.01	0.000	202.16	2.04
360	35.8	10.11	0.01	0.000	202.16	2.04
361	35.8	18.99	0.02	0.000	379.77	7.21
362	35.8	19.04	0.02	0.000	380.75	7.25
363	35.8	19.26	0.02	0.000	385.22	7.42
364	35.7	19.59	0.02	0.000	391.70	7.67
365	35.6	19.75	0.02	0.000	394.92	7.80
366	35.7	10.01	0.01	0.000	200.26	2.01
367	35.6	10.26	0.01	0.000	205.10	2.10
368	35.6	10.42	0.01	0.000	208.45	2.17
369	35.9	10.58	0.01	0.000	211.70	2.24
370	35.9	10.44	0.01	0.000	208.76	2.18
371	35.7	10.36	0.01	0.000	207.14	2.15
372	35.8	19.99	0.02	0.000	399.81	7.99
373	35.8	19.78	0.02	0.000	395.51	7.82
374	35.7	19.47	0.02	0.000	389.36	7.58
375	35.7	19.12	0.02	0.000	382.46	7.31
376	35.6	18.59	0.02	0.000	371.82	6.91
377	35.7	18.00	0.02	0.000	359.95	6.48
378	35.6	17.45	0.02	0.000	349.08	6.09
379	35.6	16.91	0.02	0.000	338.22	5.72
380	35.9	16.62	0.02	0.000	332.44	5.53
381	35.9	16.44	0.02	0.000	328.80	5.41
382	35.7	16.25	0.02	0.000	325.07	5.28
383	35.4	16.07	0.02	0.000	321.36	5.16
384	35.3	15.68	0.02	0.000	313.66	4.92
385	35.7	15.21	0.02	0.000	304.14	4.63
386	35.7	14.88	0.01	0.000	297.63	4.43
387	35.9	14.51	0.01	0.000	290.28	4.21
388	35.7	14.26	0.01	0.000	285.10	4.06
389	35.8	14.12	0.01	0.000	282.40	3.99
390	35.8	14.06	0.01	0.000	281.14	3.95
391	35.7	13.99	0.01	0.000	279.83	3.92

Time (hr)	Temperature (Celsius)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ³)	Power Density (mW/m ³)
392	35.7	13.92	0.01	0.000	278.31	3.87
393	35.7	13.84	0.01	0.000	276.83	3.83
394	35.8	13.77	0.01	0.000	275.32	3.79
395	35.6	13.68	0.01	0.000	273.65	3.74
396	35.8	13.60	0.01	0.000	272.07	3.70
397	35.4	13.53	0.01	0.000	270.60	3.66
398	35.3	13.48	0.01	0.000	269.61	3.63
399	35.7	13.35	0.01	0.000	267.00	3.56
400	35.7	13.21	0.01	0.000	264.21	3.49
401	35.6	13.12	0.01	0.000	262.42	3.44
402	35.7	13.08	0.01	0.000	261.53	3.42
403	35.8	13.06	0.01	0.000	261.17	3.41
404	35.9	12.99	0.01	0.000	259.82	3.38
405	35.7	12.94	0.01	0.000	258.82	3.35
406	35.8	12.85	0.01	0.000	257.07	3.30
407	35.4	12.70	0.01	0.000	253.93	3.22
408	35.6	12.54	0.01	0.000	250.87	3.15
409	35.5	12.44	0.01	0.000	248.87	3.10
410	35.4	12.31	0.01	0.000	246.13	3.03
411	35.3	12.20	0.01	0.000	244.00	2.98
412	35.3	12.06	0.01	0.000	241.19	2.91
413	35.7	11.96	0.01	0.000	239.11	2.86
414	35.7	11.89	0.01	0.000	237.75	2.83
415	35.6	11.83	0.01	0.000	236.59	2.80
416	35.7	11.78	0.01	0.000	235.67	2.78
417	35.8	11.72	0.01	0.000	234.34	2.75
418	35.8	11.68	0.01	0.000	233.62	2.73
419	35.8	11.57	0.01	0.000	231.36	2.68
420	35.8	11.54	0.01	0.000	230.71	2.66
421	35.7	11.55	0.01	0.000	231.02	2.67
422	35.6	11.54	0.01	0.000	230.81	2.66
423	35.7	11.53	0.01	0.000	230.65	2.66
424	35.6	11.48	0.01	0.000	229.53	2.63
425	35.6	11.37	0.01	0.000	227.38	2.59
426	35.7	11.29	0.01	0.000	225.82	2.55
427	35.8	11.19	0.01	0.000	223.70	2.50
428	35.4	11.05	0.01	0.000	221.01	2.44
429	35.6	10.94	0.01	0.000	218.77	2.39

Time (hr)	Temperature (Celsius)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ³)	Power Density (mW/m ³)
430	35.5	10.83	0.01	0.000	216.58	2.35
431	35.4	10.72	0.01	0.000	214.50	2.30
432	35.3	10.65	0.01	0.000	212.96	2.27

ตารางที่ 3 ผลของการทดลอง ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

Time (hr)	Temperature (Celsius)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ³)	Power Density (mW/m ³)
1	40.7	314.15	0.31	0.099	6282.99	1973.80
2	40.2	319.25	0.32	0.102	6384.97	2038.39
3	40.2	312.67	0.31	0.098	6253.45	1955.28
4	40.5	318.11	0.32	0.101	6362.25	2023.91
5	40.4	307.71	0.31	0.095	6154.16	1893.69
6	40.2	295.63	0.30	0.087	5912.68	1747.99
7	40.5	282.67	0.28	0.080	5653.46	1598.08
8	40.4	275.31	0.28	0.076	5506.14	1515.88
9	40.6	257.64	0.26	0.066	5152.74	1327.53
10	40.7	253.33	0.25	0.064	5066.55	1283.50
11	40.6	250.13	0.25	0.063	5002.58	1251.29
12	40.6	249.43	0.25	0.062	4988.50	1244.26
13	40.6	243.43	0.24	0.059	4868.54	1185.13
14	40.6	242.17	0.24	0.059	4843.45	1172.95
15	40.7	242.95	0.24	0.059	4858.96	1180.47
16	40.2	243.92	0.24	0.059	4878.38	1189.93
17	40.7	241.62	0.24	0.058	4832.38	1167.60
18	40.2	240.92	0.24	0.058	4818.39	1160.84
19	40.4	243.69	0.24	0.059	4873.83	1187.71
20	40.6	244.41	0.24	0.060	4888.25	1194.75
21	40.2	244.71	0.24	0.060	4894.27	1197.70
22	40.7	243.70	0.24	0.059	4874.07	1187.83
23	40.2	244.28	0.24	0.060	4885.62	1193.46
24	40.5	249.36	0.25	0.062	4987.22	1243.62
25	40.7	246.46	0.25	0.061	4929.14	1214.82
26	40.2	244.87	0.24	0.060	4897.39	1199.22
27	40.2	246.07	0.25	0.061	4921.47	1211.04
28	40.5	241.11	0.24	0.058	4822.29	1162.72

Time (hr)	Temperature (Celsius)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ³)	Power Density (mW/m ³)
29	40.6	247.15	0.25	0.061	4942.99	1221.66
30	40.7	241.36	0.24	0.058	4827.25	1165.12
31	40.4	240.13	0.24	0.058	4802.68	1153.29
32	40.5	237.58	0.24	0.056	4751.59	1128.88
33	40.4	239.85	0.24	0.058	4797.05	1150.58
34	40.4	234.92	0.23	0.055	4698.48	1103.79
35	40.5	238.44	0.24	0.057	4768.77	1137.06
36	40.4	233.62	0.23	0.055	4672.47	1091.60
37	40.4	230.85	0.23	0.053	4616.92	1065.80
38	40.2	230.08	0.23	0.053	4601.62	1058.75
39	40.4	238.75	0.24	0.057	4774.93	1140.00
40	40.2	239.67	0.24	0.057	4793.36	1148.82
41	40.4	233.24	0.23	0.054	4664.83	1088.03
42	40.6	221.98	0.22	0.049	4439.67	985.53
43	40.7	221.03	0.22	0.049	4420.66	977.11
44	40.2	225.21	0.23	0.051	4504.12	1014.36
45	40.7	226.79	0.23	0.051	4535.85	1028.70
46	40.2	225.92	0.23	0.051	4518.39	1020.79
47	40.4	228.45	0.23	0.052	4569.07	1043.82
48	40.6	222.33	0.22	0.049	4446.62	988.62
49	40.2	224.20	0.22	0.050	4484.02	1005.32
50	40.4	224.71	0.22	0.050	4494.24	1009.91
51	40.6	211.91	0.21	0.045	4238.14	898.09
52	40.7	214.89	0.21	0.046	4297.71	923.52
53	40.5	213.66	0.21	0.046	4273.13	912.98
54	40.4	210.13	0.21	0.044	4202.53	883.06
55	40.4	213.05	0.21	0.045	4261.07	907.84
56	40.4	219.41	0.22	0.048	4388.30	962.86
57	40.4	209.63	0.21	0.044	4192.64	878.91
58	40.6	208.68	0.21	0.044	4173.64	870.96
59	40.7	204.85	0.20	0.042	4097.09	839.31
60	40.6	199.75	0.20	0.040	3994.92	797.97
61	40.7	193.99	0.19	0.038	3879.87	752.67
62	40.6	195.73	0.20	0.038	3914.64	766.22
63	40.6	196.51	0.20	0.039	3930.21	772.33
64	40.6	194.50	0.19	0.038	3889.96	756.59
65	40.2	193.68	0.19	0.038	3873.57	750.23
66	40.4	189.11	0.19	0.036	3782.14	715.23

Time (hr)	Temperature (Celsius)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ³)	Power Density (mW/m ³)
67	40.2	187.31	0.19	0.035	3746.19	701.70
68	40.4	180.02	0.18	0.032	3600.35	648.13
69	40.6	185.76	0.19	0.035	3715.18	690.13
70	40.7	182.15	0.18	0.033	3643.00	663.57
71	40.2	182.39	0.18	0.033	3647.87	665.35
72	40.7	180.43	0.18	0.033	3608.64	651.11
73	40.2	183.28	0.18	0.034	3665.58	671.83
74	40.5	183.49	0.18	0.034	3669.71	673.34
75	40.6	186.67	0.19	0.035	3733.45	696.93
76	40.7	185.64	0.19	0.034	3712.85	689.26
77	40.4	185.26	0.19	0.034	3705.23	686.44
78	40.5	185.14	0.19	0.034	3702.80	685.53
79	40.4	181.77	0.18	0.033	3635.45	660.82
80	40.4	182.86	0.18	0.033	3657.21	668.76
81	40.4	184.64	0.18	0.034	3692.88	681.87
82	40.5	172.52	0.17	0.030	3450.30	595.23
83	40.4	179.95	0.18	0.032	3599.08	647.67
84	40.4	175.19	0.18	0.031	3503.89	613.86
85	40.2	175.20	0.18	0.031	3503.91	613.87
86	40.5	174.54	0.17	0.030	3490.89	609.32
87	40.4	175.97	0.18	0.031	3519.40	619.31
88	40.6	170.52	0.17	0.029	3410.31	581.51
89	40.7	171.28	0.17	0.029	3425.67	586.76
90	40.6	170.78	0.17	0.029	3415.55	583.30
91	40.6	179.66	0.18	0.032	3593.29	645.59
92	40.6	176.28	0.18	0.031	3525.53	621.47
93	40.2	176.04	0.18	0.031	3520.74	619.78
94	40.4	177.18	0.18	0.031	3543.68	627.88
95	40.6	174.19	0.17	0.030	3483.81	606.85
96	40.2	173.55	0.17	0.030	3471.02	602.40
97	40.4	179.97	0.18	0.032	3599.49	647.81
98	40.6	171.90	0.17	0.030	3438.00	590.99
99	40.7	172.53	0.17	0.030	3450.57	595.32
100	40.2	178.44	0.18	0.032	3568.79	636.81
101	40.7	162.19	0.16	0.026	3243.80	526.11
102	40.2	165.20	0.17	0.027	3304.06	545.84
103	40.5	164.91	0.16	0.027	3298.16	543.89
104	40.7	165.31	0.17	0.027	3306.28	546.57

Time (hr)	Temperature (Celsius)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ³)	Power Density (mW/m ³)
105	40.2	165.67	0.17	0.027	3313.40	548.93
106	40.5	166.59	0.17	0.028	3331.74	555.02
107	40.4	165.87	0.17	0.028	3317.49	550.29
108	40.5	163.89	0.16	0.027	3277.90	537.23
109	40.6	161.79	0.16	0.026	3235.82	523.52
110	40.7	159.23	0.16	0.025	3184.56	507.07
111	40.6	158.28	0.16	0.025	3165.69	501.08
112	40.2	158.65	0.16	0.025	3173.04	503.41
113	40.2	156.14	0.16	0.024	3122.73	487.57
114	40.5	135.74	0.14	0.018	2714.84	368.52
115	40.6	155.77	0.16	0.024	3115.39	485.28
116	40.7	150.91	0.15	0.023	3018.19	455.47
117	40.4	142.02	0.14	0.020	2840.33	403.37
118	40.5	148.99	0.15	0.022	2979.84	443.97
119	40.4	141.36	0.14	0.020	2827.18	399.65
120	40.4	143.24	0.14	0.021	2864.78	410.35
121	40.4	140.85	0.14	0.020	2816.90	396.75
122	40.4	142.90	0.14	0.020	2857.94	408.39
123	40.6	138.38	0.14	0.019	2767.64	382.99
124	40.7	138.55	0.14	0.019	2770.95	383.91
125	40.6	135.48	0.14	0.018	2709.53	367.08
126	40.4	132.25	0.13	0.017	2645.09	349.83
127	40.4	130.48	0.13	0.017	2609.57	340.49
128	40.6	125.78	0.13	0.016	2515.69	316.43
129	40.7	120.14	0.12	0.014	2402.82	288.68
130	40.6	120.20	0.12	0.014	2404.07	288.98
131	40.7	112.19	0.11	0.013	2243.73	251.72
132	40.2	125.06	0.13	0.016	2501.27	312.82
133	40.7	129.09	0.13	0.017	2581.73	333.27
134	40.2	124.11	0.12	0.015	2482.14	308.05
135	40.5	127.74	0.13	0.016	2554.75	326.34
136	40.4	128.76	0.13	0.017	2575.28	331.60
137	40.6	120.17	0.12	0.014	2403.48	288.83
138	40.7	121.06	0.12	0.015	2421.18	293.11
139	40.6	124.83	0.12	0.016	2496.68	311.67
140	40.6	124.47	0.12	0.015	2489.37	309.85
141	40.2	124.31	0.12	0.015	2486.28	309.08
142	40.7	124.01	0.12	0.015	2480.25	307.58

Time (hr)	Temperature (Celsius)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ³)	Power Density (mW/m ³)
143	40.2	123.57	0.12	0.015	2471.41	305.39
144	40.5	123.15	0.12	0.015	2463.03	303.33
145	40.4	112.82	0.11	0.013	2256.48	254.59
146	40.5	112.44	0.11	0.013	2248.77	252.85
147	40.4	112.39	0.11	0.013	2247.82	252.64
148	40.4	112.31	0.11	0.013	2246.19	252.27
149	40.4	112.43	0.11	0.013	2248.60	252.81
150	40.6	113.05	0.11	0.013	2261.06	255.62
151	40.7	112.68	0.11	0.013	2253.54	253.92
152	40.6	112.20	0.11	0.013	2243.97	251.77
153	40.2	101.45	0.10	0.010	2029.09	205.86
154	40.4	101.36	0.10	0.010	2027.27	205.49
155	40.6	101.33	0.10	0.010	2026.69	205.37
156	40.2	101.10	0.10	0.010	2021.93	204.41
157	40.4	90.94	0.09	0.008	1818.84	165.41
158	40.5	92.07	0.09	0.008	1841.44	169.55
159	40.4	92.03	0.09	0.008	1840.63	169.40
160	40.4	92.01	0.09	0.008	1840.20	169.32
161	40.6	82.00	0.08	0.007	1639.95	134.47
162	40.2	82.04	0.08	0.007	1640.75	134.60
163	40.7	81.18	0.08	0.007	1623.64	131.81
164	40.2	82.03	0.08	0.007	1640.51	134.56
165	40.5	82.02	0.08	0.007	1640.37	134.54
166	40.2	82.01	0.08	0.007	1640.13	134.50
167	40.4	71.98	0.07	0.005	1439.67	103.63
168	40.5	71.94	0.07	0.005	1438.85	103.51
169	40.4	71.90	0.07	0.005	1437.94	103.38
170	40.4	71.85	0.07	0.005	1437.03	103.25
171	40.4	71.83	0.07	0.005	1436.57	103.19
172	40.6	71.82	0.07	0.005	1436.42	103.17
173	40.6	71.82	0.07	0.005	1436.38	103.16
174	40.2	71.81	0.07	0.005	1436.29	103.15
175	40.7	71.81	0.07	0.005	1436.12	103.12
176	40.2	71.80	0.07	0.005	1435.95	103.10
177	40.5	71.78	0.07	0.005	1435.58	103.04
178	40.6	61.77	0.06	0.004	1235.33	76.30
179	40.7	61.76	0.06	0.004	1235.19	76.28
180	40.2	61.74	0.06	0.004	1234.85	76.24

Time (hr)	Temperature (Celsius)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ³)	Power Density (mW/m ³)
181	40.7	51.83	0.05	0.003	1036.55	53.72
182	40.2	56.97	0.06	0.003	1139.38	64.91
183	40.5	56.82	0.06	0.003	1136.42	64.57
184	40.6	56.74	0.06	0.003	1134.88	64.40
185	40.7	56.53	0.06	0.003	1130.59	63.91
186	40.6	56.36	0.06	0.003	1127.27	63.54
187	40.2	56.28	0.06	0.003	1125.52	63.34
188	40.4	56.15	0.06	0.003	1122.97	63.05
189	40.5	45.81	0.05	0.002	916.11	41.96
190	40.4	45.67	0.05	0.002	913.35	41.71
191	40.4	45.44	0.05	0.002	908.81	41.30
192	40.4	45.15	0.05	0.002	902.93	40.76
193	40.4	34.99	0.03	0.001	699.72	24.48
194	40.6	34.89	0.03	0.001	697.77	24.34
195	40.7	34.76	0.03	0.001	695.24	24.17
196	40.6	34.69	0.03	0.001	693.82	24.07
197	40.6	34.49	0.03	0.001	689.85	23.79
198	40.2	34.29	0.03	0.001	685.78	23.51
199	40.4	34.13	0.03	0.001	682.63	23.30
200	40.5	23.94	0.02	0.001	478.87	11.47
201	40.4	23.73	0.02	0.001	474.70	11.27
202	40.6	23.59	0.02	0.001	471.72	11.13
203	40.7	23.44	0.02	0.001	468.82	10.99
204	40.6	23.29	0.02	0.001	465.75	10.85
205	40.6	23.12	0.02	0.001	462.45	10.69
206	40.2	12.95	0.01	0.000	259.08	3.36
207	40.7	12.79	0.01	0.000	255.84	3.27
208	40.2	12.68	0.01	0.000	253.60	3.22
209	40.5	12.60	0.01	0.000	251.96	3.17
210	40.6	12.50	0.01	0.000	250.04	3.13
211	40.7	12.40	0.01	0.000	248.06	3.08
212	40.6	12.34	0.01	0.000	246.89	3.05
213	40.5	12.29	0.01	0.000	245.84	3.02
214	40.6	12.24	0.01	0.000	244.87	3.00
215	40.2	12.25	0.01	0.000	245.03	3.00
216	40.4	11.22	0.01	0.000	224.50	2.52
217	40.5	11.22	0.01	0.000	224.40	2.52
218	40.4	11.22	0.01	0.000	224.31	2.52

Time (hr)	Temperature (Celsius)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ³)	Power Density (mW/m ³)
219	40.4	11.21	0.01	0.000	224.29	2.52
220	40.4	11.17	0.01	0.000	223.44	2.50
221	40.6	11.16	0.01	0.000	223.17	2.49
222	40.7	11.15	0.01	0.000	222.94	2.49
223	40.6	11.13	0.01	0.000	222.60	2.48
224	40.6	11.12	0.01	0.000	222.41	2.47
225	40.2	19.84	0.02	0.000	396.84	7.87
226	40.4	19.11	0.02	0.000	382.14	7.30
227	40.5	19.10	0.02	0.000	382.10	7.30
228	40.4	19.10	0.02	0.000	382.06	7.30
229	40.4	19.10	0.02	0.000	382.02	7.30
230	40.4	18.10	0.02	0.000	361.98	6.55
231	40.4	18.10	0.02	0.000	361.94	6.55
232	40.5	18.09	0.02	0.000	361.88	6.55
233	40.5	18.09	0.02	0.000	361.84	6.55
234	40.4	17.09	0.02	0.000	341.79	5.84
235	40.4	17.09	0.02	0.000	341.75	5.84
236	40.5	17.09	0.02	0.000	341.71	5.84
237	40.6	17.08	0.02	0.000	341.66	5.84
238	40.7	17.08	0.02	0.000	341.61	5.83
239	40.6	16.08	0.02	0.000	321.57	5.17
240	40.6	16.08	0.02	0.000	321.54	5.17
241	40.2	16.08	0.02	0.000	321.51	5.17
242	40.4	16.07	0.02	0.000	321.49	5.17
243	40.5	16.07	0.02	0.000	321.46	5.17
244	40.4	16.07	0.02	0.000	321.43	5.17
245	40.4	16.07	0.02	0.000	321.41	5.17
246	40.5	15.07	0.02	0.000	301.37	4.54
247	40.6	15.07	0.02	0.000	301.35	4.54
248	40.7	15.07	0.02	0.000	301.33	4.54
249	40.2	15.07	0.02	0.000	301.31	4.54
250	40.5	15.07	0.02	0.000	301.30	4.54
251	40.6	15.07	0.02	0.000	301.31	4.54
252	40.7	15.07	0.02	0.000	301.31	4.54
253	40.6	15.07	0.02	0.000	301.33	4.54
254	40.6	15.07	0.02	0.000	301.35	4.54
255	40.2	15.07	0.02	0.000	301.36	4.54
256	40.4	15.07	0.02	0.000	301.37	4.54

Time (hr)	Temperature (Celsius)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ³)	Power Density (mW/m ³)
257	40.5	15.07	0.02	0.000	301.38	4.54
258	40.4	15.07	0.02	0.000	301.39	4.54
259	40.4	15.07	0.02	0.000	301.40	4.54
260	40.5	15.07	0.02	0.000	301.39	4.54
261	40.6	15.07	0.02	0.000	301.39	4.54
262	40.7	15.07	0.02	0.000	301.37	4.54
263	40.2	15.07	0.02	0.000	301.36	4.54
264	40.5	15.07	0.02	0.000	301.34	4.54
265	40.6	15.07	0.02	0.000	301.32	4.54
266	40.7	14.07	0.01	0.000	281.30	3.96
267	40.6	14.06	0.01	0.000	281.29	3.96
268	40.5	14.06	0.01	0.000	281.28	3.96
269	40.6	14.06	0.01	0.000	281.26	3.96
270	40.2	14.06	0.01	0.000	281.25	3.96
271	40.4	14.06	0.01	0.000	281.24	3.95
272	40.5	14.06	0.01	0.000	281.21	3.95
273	40.4	14.06	0.01	0.000	281.19	3.95
274	40.4	14.06	0.01	0.000	281.17	3.95
275	40.5	13.06	0.01	0.000	261.14	3.41
276	40.4	13.06	0.01	0.000	261.12	3.41
277	40.4	15.52	0.02	0.000	310.42	4.82
278	40.5	15.44	0.02	0.000	308.80	4.77
279	40.4	15.35	0.02	0.000	307.08	4.71
280	40.5	15.23	0.02	0.000	304.51	4.64
281	40.4	15.17	0.02	0.000	303.34	4.60
282	40.6	15.09	0.02	0.000	301.74	4.55
283	40.7	15.03	0.02	0.000	300.65	4.52
284	40.5	15.02	0.02	0.000	300.45	4.51
285	40.6	15.02	0.02	0.000	300.47	4.51
286	40.6	15.06	0.02	0.000	301.15	4.53
287	40.6	15.09	0.02	0.000	301.77	4.55
288	40.6	15.11	0.02	0.000	302.20	4.57
289	40.4	14.10	0.01	0.000	282.05	3.98
290	40.5	14.10	0.01	0.000	282.00	3.98
291	40.4	14.10	0.01	0.000	281.94	3.97
292	40.5	14.10	0.01	0.000	281.93	3.97
293	40.4	14.11	0.01	0.000	282.13	3.98
294	40.4	14.11	0.01	0.000	282.24	3.98

Time (hr)	Temperature (Celsius)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ³)	Power Density (mW/m ³)
295	40.5	14.12	0.01	0.000	282.49	3.99
296	40.5	14.12	0.01	0.000	282.44	3.99
297	40.4	14.12	0.01	0.000	282.39	3.99
298	40.4	14.12	0.01	0.000	282.42	3.99
299	40.5	14.12	0.01	0.000	282.36	3.99
300	40.6	14.12	0.01	0.000	282.30	3.98
301	40.2	14.11	0.01	0.000	282.17	3.98
302	40.4	14.10	0.01	0.000	282.08	3.98
303	40.5	14.11	0.01	0.000	282.10	3.98
304	40.6	14.11	0.01	0.000	282.18	3.98
305	40.6	14.12	0.01	0.000	282.35	3.99
306	40.6	14.13	0.01	0.000	282.52	3.99
307	40.7	14.12	0.01	0.000	282.38	3.99
308	40.6	14.12	0.01	0.000	282.35	3.99
309	40.7	14.12	0.01	0.000	282.32	3.99
310	40.2	14.10	0.01	0.000	282.03	3.98
311	40.5	14.09	0.01	0.000	281.88	3.97
312	40.6	14.08	0.01	0.000	281.64	3.97
313	40.7	14.07	0.01	0.000	281.48	3.96
314	40.6	14.08	0.01	0.000	281.57	3.96
315	40.5	14.08	0.01	0.000	281.55	3.96
316	40.6	14.07	0.01	0.000	281.48	3.96
317	40.2	14.08	0.01	0.000	281.64	3.97
318	40.4	14.09	0.01	0.000	281.78	3.97
319	40.5	14.09	0.01	0.000	281.72	3.97
320	40.4	14.09	0.01	0.000	281.75	3.97
321	40.4	14.09	0.01	0.000	281.89	3.97
322	40.5	14.10	0.01	0.000	281.99	3.98
323	40.4	14.10	0.01	0.000	281.98	3.98
324	40.5	14.10	0.01	0.000	282.05	3.98
325	40.4	14.10	0.01	0.000	282.08	3.98
326	40.4	14.11	0.01	0.000	282.19	3.98
327	40.4	14.11	0.01	0.000	282.11	3.98
328	40.4	14.10	0.01	0.000	281.99	3.98
329	40.5	14.11	0.01	0.000	282.18	3.98
330	40.6	14.11	0.01	0.000	282.27	3.98
331	40.2	14.11	0.01	0.000	282.29	3.98
332	40.4	14.11	0.01	0.000	282.28	3.98

Time (hr)	Temperature (Celsius)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ³)	Power Density (mW/m ³)
333	40.5	14.12	0.01	0.000	282.38	3.99
334	40.4	14.12	0.01	0.000	282.36	3.99
335	40.4	14.12	0.01	0.000	282.47	3.99
336	40.5	14.13	0.01	0.000	282.53	3.99
337	40.4	14.13	0.01	0.000	282.52	3.99
338	40.5	14.13	0.01	0.000	282.56	3.99
339	40.4	11.41	0.01	0.000	228.27	2.61
340	40.4	14.13	0.01	0.000	282.69	4.00
341	40.5	14.14	0.01	0.000	282.70	4.00
342	40.6	14.14	0.01	0.000	282.77	4.00
343	40.2	14.15	0.01	0.000	282.94	4.00
344	40.4	14.16	0.01	0.000	283.20	4.01
345	40.5	14.18	0.01	0.000	283.52	4.02
346	40.4	14.19	0.01	0.000	283.77	4.03
347	40.4	14.20	0.01	0.000	283.98	4.03
348	40.5	14.20	0.01	0.000	284.05	4.03
349	40.6	14.20	0.01	0.000	283.93	4.03
350	40.7	14.20	0.01	0.000	283.93	4.03
351	40.5	14.20	0.01	0.000	284.02	4.03
352	40.6	14.20	0.01	0.000	284.03	4.03
353	40.6	14.21	0.01	0.000	284.28	4.04
354	40.6	14.23	0.01	0.000	284.67	4.05
355	40.6	14.24	0.01	0.000	284.70	4.05
356	40.4	14.24	0.01	0.000	284.78	4.06
357	40.2	14.24	0.01	0.000	284.86	4.06
358	40.2	14.24	0.01	0.000	284.85	4.06
359	40.4	14.25	0.01	0.000	285.02	4.06
360	40.5	14.27	0.01	0.000	285.31	4.07
361	40.4	13.02	0.01	0.000	260.40	3.39
362	40.4	13.01	0.01	0.000	260.29	3.39
363	40.5	13.00	0.01	0.000	260.07	3.38
364	40.6	12.98	0.01	0.000	259.61	3.37
365	40.7	12.99	0.01	0.000	259.89	3.38
366	40.5	13.01	0.01	0.000	260.14	3.38
367	40.6	13.01	0.01	0.000	260.24	3.39
368	40.6	13.00	0.01	0.000	260.02	3.38
369	40.6	13.00	0.01	0.000	259.96	3.38
370	40.7	13.00	0.01	0.000	260.06	3.38

Time (hr)	Temperature (Celsius)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ³)	Power Density (mW/m ³)
371	40.6	13.01	0.01	0.000	260.21	3.39
372	40.7	13.02	0.01	0.000	260.37	3.39
373	40.2	13.01	0.01	0.000	260.25	3.39
374	40.5	13.00	0.01	0.000	259.95	3.38
375	40.6	13.02	0.01	0.000	260.36	3.39
376	40.7	13.02	0.01	0.000	260.37	3.39
377	40.6	13.02	0.01	0.000	260.37	3.39
378	40.5	13.02	0.01	0.000	260.44	3.39
379	40.7	13.02	0.01	0.000	260.34	3.39
380	40.6	13.03	0.01	0.000	260.64	3.40
381	40.6	13.05	0.01	0.000	261.02	3.41
382	40.4	13.02	0.01	0.000	260.42	3.39
383	40.2	13.01	0.01	0.000	260.30	3.39
384	40.2	13.01	0.01	0.000	260.13	3.38
385	40.4	13.01	0.01	0.000	260.15	3.38
386	40.5	13.01	0.01	0.000	260.28	3.39
387	40.4	13.02	0.01	0.000	260.33	3.39
388	40.4	13.02	0.01	0.000	260.30	3.39
389	40.4	13.01	0.01	0.000	260.23	3.39
390	40.5	13.03	0.01	0.000	260.56	3.39
391	40.4	13.03	0.01	0.000	260.65	3.40
392	40.4	13.01	0.01	0.000	260.19	3.39
393	40.5	13.02	0.01	0.000	260.31	3.39
394	40.4	13.04	0.01	0.000	260.77	3.40
395	40.5	13.06	0.01	0.000	261.14	3.41
396	40.4	13.08	0.01	0.000	261.60	3.42
397	40.4	13.09	0.01	0.000	261.81	3.43
398	40.4	13.10	0.01	0.000	261.96	3.43
399	40.2	13.10	0.01	0.000	261.91	3.43
400	40.4	13.11	0.01	0.000	262.19	3.44
401	40.4	13.11	0.01	0.000	262.18	3.44
402	40.4	13.10	0.01	0.000	262.03	3.43
403	40.4	13.10	0.01	0.000	261.94	3.43
404	40.4	13.10	0.01	0.000	261.91	3.43
405	40.4	13.12	0.01	0.000	262.43	3.44
406	40.5	13.13	0.01	0.000	262.63	3.45
407	40.4	13.12	0.01	0.000	262.35	3.44
408	40.4	13.14	0.01	0.000	262.74	3.45

Time (hr)	Temperature (Celsius)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ³)	Power Density (mW/m ³)
409	40.5	13.16	0.01	0.000	263.11	3.46
410	40.4	13.15	0.01	0.000	262.91	3.46
411	40.4	13.14	0.01	0.000	262.84	3.45
412	40.4	13.17	0.01	0.000	263.32	3.47
413	40.4	13.18	0.01	0.000	263.54	3.47
414	40.4	13.20	0.01	0.000	263.91	3.48
415	40.4	13.19	0.01	0.000	263.77	3.48
416	40.4	13.22	0.01	0.000	264.40	3.50
417	40.5	13.20	0.01	0.000	264.10	3.49
418	40.4	13.22	0.01	0.000	264.44	3.50
419	40.5	13.25	0.01	0.000	265.05	3.51
420	40.4	13.26	0.01	0.000	265.11	3.51
421	40.4	13.26	0.01	0.000	265.23	3.52
422	40.5	13.27	0.01	0.000	265.48	3.52
423	40.4	13.30	0.01	0.000	265.97	3.54
424	40.4	13.30	0.01	0.000	265.93	3.54
425	40.4	13.31	0.01	0.000	266.11	3.54
426	40.4	13.31	0.01	0.000	266.21	3.54
427	40.5	13.34	0.01	0.000	266.71	3.56
428	40.4	13.32	0.01	0.000	266.47	3.55
429	40.4	13.30	0.01	0.000	266.03	3.54
430	40.4	13.29	0.01	0.000	265.83	3.53
431	40.4	13.32	0.01	0.000	266.31	3.55
432	40.4	13.31	0.01	0.000	266.11	3.54



1. การวิเคราะห์ค่าทางไฟฟ้า

ค่าทางไฟฟ้าที่ใช้แสดงความสามารถในการผลิตกระแสไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ได้แก่ กำลังไฟฟ้า (P : Power) คำนวณจากสมการที่ 1 ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า (PD : Power Density) คำนวณจากสมการที่ 2 พลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่ SMFC ผลิตได้ตลอดระยะเวลาเดินระบบ (EE : Electrical Energy) คำนวณจากสมการที่ 2

$$P = V \cdot I \quad (1)$$

เมื่อ P คือ กำลังไฟฟ้า หน่วยเป็นวัตต์ (W)
 V คือ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า หน่วยเป็นโวลต์ (V)
 I คือ ค่ากระแสไฟฟ้า หน่วยเป็นแอมแปร์ (A)

$$PD = P / Vol \quad (2)$$

เมื่อ Pd คือ ค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า หน่วยเป็นวัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร (W/m^3)
 $Vol.$ คือ ปริมาตรของ SMFC หน่วยเป็นลูกบาศก์เมตร (m^3)

$$EE = \int_{t_0}^{t_n} P dt = \sum_i P_i \cdot t_i \quad (3)$$

เมื่อ EE คือ พลังงานไฟฟ้าที่ SMFC ผลิตได้ตั้งแต่เวลา t_0 ถึงเวลา t_n หน่วยเป็นวัตต์ ชั่วโมง (Whr)
 t คือ เวลา หน่วยเป็นชั่วโมง (hr)
 i คือ จำนวนข้อมูลรายชั่วโมงที่เก็บได้

2. การคำนวณความสามารถในการกำจัดกากตะกอน

2.1 ประสิทธิภาพการกำจัดกากตะกอน

งานวิจัยนี้ได้เก็บตัวอย่างของผสมรูป slurry .ในถัง SMFC มาวิเคราะห์ค่า COD, TS และ VS ตามวิธีที่แสดงในตารางที่ 7 เพื่อใช้เป็นตัวแทนแสดงปริมาณกากตะกอนที่อยู่ในระบบ และ

ผู้วิจัยได้เลือกใช้ค่า COD เป็นตัวแทนในการคำนวณหาประสิทธิภาพการกำจัดกากตะกอน (RE : COD Removal Efficiency) ดังสมการที่ 4

$$RE = (COD_{before} - COD_{after}) \cdot 100 / COD_{before} \quad (4)$$

เมื่อ	RE	คือ	ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี (%)
	COD_{before}	คือ	ค่าซีโอดีก่อนการบำบัด (mgCOD/gTS)
	COD_{after}	คือ	ค่าซีโอดีหลังการบำบัด (mgCOD/gTS)

2.2 อัตราเร็วในการกำจัดกากตะกอน

ผู้วิจัยได้เลือกใช้ค่า COD เป็นตัวแทนในการคำนวณหาอัตราเร็วในการกำจัดกากตะกอน (RR : COD Removal Rate) ดังสมการที่ 5

$$RR = (COD_{before} - COD_{after}) / RT \quad (5)$$

เมื่อ	RR	คือ	อัตราเร็วในการกำจัดกากตะกอนส่วนเกิน (mgCOD/gTS-hr)
	RT	คือ	ระยะเวลาตั้งแต่เริ่มระบบจนถึงระยะเวลาที่ต้องการวิเคราะห์ (hr)

3. วิธีวิเคราะห์ซีโอดีในกากตะกอนส่วนเกิน (Noguerol-Arias et al., 2012)

วิธีวิเคราะห์ซีโอดีในกากตะกอนส่วนเกินในงานวิจัยนี้มาจาก (Noguerol-Arias et al., 2012) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ค่าซีโอดีในตัวอย่างสกัดจากรองมาสุกร โดยวิธีที่ใช้เรียกว่า Solid Dilution Method (SD) ซึ่งถือว่าเป็นวิธีที่มีความแม่นยำเมื่อเทียบกับวิธีวิเคราะห์ซีโอดี แบบ Standard Method โดยมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ ร้อยละ 1.4

3.1 การเจือจางสารละลาย Solid Dilution Method (SD)

3.1.1 เตรียมตัวอย่างที่อยู่ในสถานะของแข็งปริมาณ 200 มิลลิกรัม

3.1.2 ผสมด้วย $MgSO_4$ บดละเอียด 50 - 200 มิลลิกรัม (ค่าเริ่มต้น 100 มิลลิกรัม)

3.2 วิธีวิเคราะห์

3.2.1 ล้างหลอดย่อยสลาย (Digestion Tubes) และฝาจุกด้วยกรดซัลฟิวริก ร้อยละ 20 ก่อนนำไปใช้ เพื่อป้องกันการปนเปื้อนด้วยสารอินทรีย์

3.2.2 เลือกใช้ปริมาตรของตัวอย่างน้ำและสารเคมีที่เหมาะสม ดังนี้

ขนาดของภาชนะย่อยสลาย	ตัวอย่าง (มิลลิลิตร)	สารละลายในการย่อยสลาย (มิลลิลิตร)	กรดซัลฟิวริกเอเจนต์ (มิลลิลิตร)	ปริมาตรทั้งหมด (มิลลิลิตร)
<u>หลอดย่อยสลาย</u>				
16 x 100 มม.	2.5	1.5	3.5	7.5
20 x 150 มม.	5.0	3.0	7.0	15.0
25 x 150 มม.	10.0	6.0	14.0	30.0

3.2.3 นำตัวอย่างมาใส่หลอดย่อยสลายที่เตรียมไว้ เติมสารละลายที่ใช้ในการย่อยสลายซึ่งได้แก่สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมต

3.2.4 ค่อยๆเทกรดซัลฟิวริกเอเจนต์ลงไปหลอดโดยให้กรดซัลฟิวริกเอเจนต์ไหลลงก้นหลอดแก้วเพื่อให้ชั้นของกรดอยู่ใต้ชั้นตัวอย่างและน้ำย่อยสลาย

3.2.5 ปิดจุกหลอดแก้วให้แน่น แล้วคว่ำหลอดแก้วไปมาหลายๆครั้งเพื่อผสมให้เข้ากันอย่างทั่วถึง

3.2.6 นำหลอดทดลองเหล่านี้ไปใส่ในเตาอบ (Hot Air Oven) ซึ่งได้ทำให้ร้อนถึงอุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ใช้เวลานาน 2 ชั่วโมง แล้วทิ้งให้เย็นถึงอุณหภูมิห้องโดยนำหลอดทดลองมาวางไว้ใน Test tube rack (ที่วางหลอดแก้ว)

3.2.7 เปิดฝาจุก แล้วเทผสมลงในภาชนะที่ใหญ่กว่าเพื่อนำไปไทเทรต เติมเฟอโรอินดิเคเตอร์ 0.05 - 0.1 มิลลิลิตร (1 หรือ 2 หยด) คนอย่างรวดเร็วขณะที่ไทเทรตด้วย 0.1 โม

ลาร์ เฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (Ferrous Ammonium Sulfate) จุดยุติจะเปลี่ยนอย่างรวดเร็วจากฟ้าอมเขียวเป็นน้ำตาลแดง

3.2.8 ด้วยวิธีทำเช่นเดียวกันแต่ใช้น้ำกลั่นแทนตัวอย่างน้ำ โดยการรีฟลักซ์น้ำกลั่น (Blank) แล้วไทเทรตแบลงค์ซึ่งมีรีเอเจนต์และปริมาตรน้ำกลั่นเท่ากับปริมาตรของตัวอย่างน้ำที่ใช้

3.2.9 ด้วยวิธีทำเช่นเดียวกันแต่ใช้สารละลายซีโอดีมาตรฐานแทนตัวอย่าง โดยใช้รีเอเจนต์ต่าง ๆ เหมือนกับที่ใช้กับตัวอย่าง แล้วคำนวณหาค่าซีโอดีเพื่อตรวจสอบวิธีการวิเคราะห์ว่าถูกต้องหรือไม่

3.3 การคำนวณหาซีโอดีในของผสมที่นำไปวิเคราะห์

$$COD = ((A \times B) \times M \times 8000) / C$$

เมื่อ COD คือ ค่าซีโอดี (mg/L)

A คือ ปริมาตรของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต ที่ใช้ในการไทเทรตแบลงค์ (ml)

B คือ ปริมาตรของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรตตัวอย่าง (ml)

M คือ ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต

C คือ ปริมาตรของผสมที่นำไปวิเคราะห์ (ml)

3.4 การคำนวณค่าซีโอดีในกากตะกอนส่วนเกิน

นำความเข้มข้นซีโอดีในของผสมในข้อ 3.3 ไปคูณปริมาตรของผสมที่นำไปวิเคราะห์ (50 ml) แล้วหารด้วยมวลของกากตะกอนส่วนเกินที่นำมาวิเคราะห์ (200 mg)

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	ประพันธ์ ประจันตะเสน
วันเกิด	วันอาทิตย์ที่ 8 กันยายน พ.ศ.2534
สถานที่เกิด	อำเภอเมือง จังหวัดมหาสารคาม
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	บ้านเลขที่ 85 หมู่ที่ 4 ตำบลท่าขอนยาง อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150
ประวัติการศึกษา	พ.ศ.2552 มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยมหาสารคาม พ.ศ.2557 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิศวกรรม สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปัจจุบันกำลังศึกษา ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) สาขา วิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

พูนันท์ ปณฺฑิต โท ชีวะ